



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

一种遮阳式被动式节能呼吸窗的优化与应用研究

姓名：陈璐

学号：1232862

所在院系：机械与能源工程学院

学科门类：工学

学科专业：供热、供燃气、通风及空调工程

指导教师：许鹏 教授

二〇一五年三月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Engineering

**Optimization and experimental validation
of a seasonal shading ventilated window**

Candidate: Chen Lu

Student Number: 1232862

School/Department: School of Mechanical and
Energy Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Heating, Gas Supplying, Ventilation and
Air Conditioning

March, 2015

一种遮阳式被动式节能呼吸窗的优化与应用研究
陈璐
同济大学

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本；学校有权保留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：所呈交的学位论文，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

摘要

介绍了一种新型变季节遮阳呼吸窗。从理论上分析了该种变季节遮阳呼吸窗的原理,以及室外风速风向及太阳辐射等因素对其气流组织及能耗的影响。应用 EnergyPlus 分析了变季节遮阳呼吸窗的结构对其气流组织情况及建筑能耗的影响,从而对该种呼吸窗的包括空腔底部缝隙宽度、上悬(夏季模型)及下悬(冬季模型)角度、内层窗顶部缝隙高度(冬季模型)这些结构参数进行优化,以达到最大的节能效果,但模拟结果与实验结果均表明,遮阳呼吸窗的节能效果与这些结构尺寸的关系并不大,而与天气条件以及一天内的时间段有关。为验证此结论,本文对呼吸窗在不同气候区域的适用性进行了研究,主要对欧洲几种典型气候的代表城市:芬兰、波兰、柏林、巴黎、罗马以及位于中国夏热冬冷地区的上海,发现不同的几何尺寸对呼吸窗的节能效果影响很微弱,而气候对 STS 呼吸窗的节能效果的影响非常大,且在冬季,室外温度越低,呼吸窗的节能性越高。并且夜间的节能效果大于白天。冬季模型对各个不同气候区域的节能效果都较高,其中芬兰、波兰的节能效果最大,而夏季模型的节能效果则相对较低。本文最后给出了一些在呼吸窗应用时的建议,如在过渡季节时打开内层缝隙可以起到很好的节能作用;冬季,在满足最小新风量的基础上,减小开启角度以及内缝的开启。

关键词: 建筑节能、被动式、呼吸窗

ABSTRACT

This paper described a new kind of seasonal ventilated window. It analyzed the principle of seasonal shading ventilated window and the influence of outdoor air flow rate and solar radiation on the air flow pattern and building energy consumption. This paper established models of different angle, bottom gap distance, crack height of inner window and optimized these parameters; This paper also researched on the suitability of STS window in different climate zones: Finland, Poland, Berlin, Paris, Rome, and Shanghai, China. And it turned out that the geometric parameters has little influence on the energy performance on STS window, while the type of climate zone has great influence on the energy performance, and the energy saving effect in heating seasons is far more greater than that in cooling seasons. The energy performance of STS windows in different climate zones in heating seasons prove to be excellent, especially in cold climates of Europe, like Finland and Poland.

Key Words: building energy efficiency, ventilated window, seasonal

目录

第 1 章 引言.....	1
1.1 概述.....	2
1.2 呼吸窗国内外研究现状.....	4
1.2.1 国内研究现状.....	4
1.2.2 国外研究现状.....	7
1.2.3 本论文研究内容.....	11
第 2 章 遮阳被动式节能呼吸窗及其数学模型.....	12
2.1 呼吸窗的结构.....	12
2.2 呼吸窗的原理.....	13
2.3 气流组织分析.....	14
2.3.1 空腔内的气流.....	14
2.3.2 热压效应.....	14
2.3.3 风压效应.....	15
2.4 传热模型分析.....	17
2.4.1 呼吸窗内部的传热.....	17
2.4.2 呼吸窗与周围环境的传热.....	17
2.4.3 空腔内部的传热.....	18
第 3 章 遮阳被动式节能呼吸窗模型的建立.....	21
3.1 模拟软件的选用.....	21
3.1.1 模拟软件的选用——EnergyPlus.....	21
3.1.2 Air Flow Network 模块.....	21
3.2 EnergyPlus 模型的建立.....	23
3.2.1 模型分区.....	23
3.2.2 呼吸窗的传热系统设置.....	25
3.2.3 透射太阳辐射的模型设置.....	26
3.2.4 空腔内的垂直气流.....	26
3.2.5 STS 夏季模型的建立.....	28
3.2.6 冬季模型的建立.....	30
第四章 模拟结果的分析.....	32
4.1 气流组织结果.....	32
4.2 温度模拟结果.....	34
4.3 冷热负荷模拟结果.....	38
4.3.1 夏季模型负荷结果.....	38

4.3.2 冬季模型负荷结果.....	41
4.4 探讨 STS 模型对气候的适应性.....	46
第五章 呼吸窗的节能性验证.....	50
5.1 实验平台简介.....	50
5.2 实验描述.....	51
5.2.1 实验对象.....	51
5.2.2 实验方案.....	59
5.2.3 实验内容.....	59
5.3 实验结果分析.....	64
5.3.1 加热量结果.....	64
5.3.2 温度结果.....	66
5.3.3 气流测量结果.....	67
5.4 模拟与实验结果对比.....	69
第六章 结论与展望.....	71
6.1 结论.....	71
6.2 进一步工作的方向.....	72
致谢.....	74
参考文献.....	75
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	78

专业术语	
ΔP_{tot}	进出口总压差 (Pa)
ΔP_{stack}	热压引起的压差 (Pa)
ΔP_{wind}	风压造成的压差 (Pa)
C_d	流量系数, 在模拟中取 0.83
A_{eq}	开口的当量面积 (m^2)
$C\Delta P_{op1}$	开口 1 处由于风压引起的压力系数
Q_{c-out}, Q_{c-in}	呼吸窗与室内外环境之间对流传热的热量 (W)
h_{c-out}, h_{c-in}	呼吸窗与室内外环境对流换热的对流换热系数 ($W/m^2.k$)
Q_{r-out}, Q_{r-in}	呼吸窗与室内外环境之间辐射换热的热量 (W)
h_{r-out}, h_{r-in}	呼吸窗与室内外环境辐射换热的对流换热系数 ($W/m^2.k$)
q_{r-ch}	单位面积的辐射换热量 (W/m^2)
ϵ_1, ϵ_2	与室内外环境相接触的空腔表面的发射系数
F_{12}	各表面之间的角系数
A_1, A_2	辐射表面的面积 (m^2)
Q_{use}	玻璃传给气流的有效热量 (W)
A_{w1}, A_{w2}	玻璃的内表面与外表面的面积 (m^2)
h_{c-ch}	空腔内的对流换热系数 ($W/m^2.k$)
h_{c-ch}	空腔内的对流换热系数 ($W/m^2.k$)
h_c	不通风的空腔中的对流换热系数 ($W/m^2.k$)
Nu	努谢尔特数
λ	导热系数 ($W/m.K$)
Re	雷诺数
β	空腔内气体的热线膨胀系数 ($1/K$)
C_p	空气的定压比热容 ($J/(kg.K)$)
μ	空气的粘度 (kg/ms)
$\dot{m}_{buo. max}$	压差引起的自然对流质量流量 (kg/s)
D_H	水力直径 (m)
ρ_{ave}	上区和下区之间的平均空气密度差 (kg/m^3)
C_d	流量系数

第 1 章 引言

1.1 概述

随着我国人民生活水平不断提高,对居住建筑舒适性的要求越来越高,因此产生的建筑能耗总量也在逐年上升。据建设部测算,到 2030 年,我国建筑能耗将占社会总能耗的 30%-40%^[1]。而采暖和空调系统的能耗占建筑总能耗的 55%^[2],成为了建筑能源消费的大户。随着国家节能政策的推行,各行业都致力于发展与节能、新能源利用相关的项目,建筑行业更是节能项目建设的领头羊,对于建筑围护结构的节能改造正焕发着勃勃生机,尤其是窗户,因为外窗是建筑围护结构体系中节能的重要环节,尤其是在夏热冬冷地区,夏季时间长,太阳辐射强度大,气候闷热;冬季阴冷,日照缺乏。这种气候条件要求该地区的建筑外窗冬季保温,夏季隔热。其节能问题直接影响室内热环境质量,住宅建筑门窗既承担着隔绝于沟通室内外环境的双重任务,不仅要求良好的保温隔热性能,同时还应具有通风、日照、采光、隔声等功能性要求。窗户较墙体或屋顶,保温隔热性能差,加之具有开关构造,密封性较低,且透明的窗户玻璃,能够直接透射太阳辐射热。另一方面,以前的住宅外窗因气密性及保温性能不佳不得不设计的很小,只考虑必要的采光、通风和日照。随着人们观念的改变,对室内空间质量和景观的要求日益增高,同时还有建筑立面设计的考虑,如今的窗户设计的越来越大,有的甚至成为了玻璃幕墙,极大的追求通透、宽敞明亮的效果。这一窗户设计无疑对窗户自身的节能性能提出了更高的要求。

相较于西方发达国家,我国居住建筑节能窗发展起步较晚。首先,在住宅建筑能耗方面,我国住宅建筑的单位面积总能耗为国外发达国家的 3 倍左右,外窗为 1.5-2.2 倍,门窗空气渗透为 3-6 倍;其次,节能标准方面,多数发达国家已多次修订节能标准,相关的节能指标达到了较高水平,如德国北方地区要求住宅外窗的传热系数降至 $1.08\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,法国的要求为 $2.25\sim 2.45\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。我国现有的《夏热冬冷地区住宅建筑节能设计标准》中规定外窗的传热系数为 $2.5\sim 4.7\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。再者,由于成本的问题,高质量的中空玻璃、Low-e 玻璃在住宅建筑中的使用率仍然很低。西方发达国家自上世纪 70 年代就开展建筑节能工作,至今已取得十分突出的成效,如表 1 所示。首先,在材料上从透光、挡风挡雨等简单功能到节能、舒适、安全、采光灵活等;其次,在技术上从使用普通的平板玻璃到使用中空隔热技术(中空玻璃)和各种高性能的绝热制模技术(热

反射玻璃、Low-e 玻璃等)。最近，发达国家已研制成功一种智能玻璃，在低电压作用下可调节颜色深浅，可以在一定程度上调节太阳辐射，更好的解决采光与隔热的问题，在不同的季节都取得更佳的节能效果^[3]。相较于西方发达国家，我国建筑节能窗发展起步较晚。

表 1 国外节能门窗的功能和技术性能发展

年代	功能要求	窗户材料（玻璃）	传热系数 K(W/m ² ·K)	特点
20 世纪 70 年代以前	透光, 挡风挡雨	单玻窗	5.4-6.4	绝热差, 能耗大
20 世纪 70 年代	限制能耗	单玻双框窗 空气层 6-12mm	3.0-4.4	绝热性能明显增强
20 世纪 80 年代	节能、舒适	中空玻璃	2.3-2.8	性能显著提高 绝热好, 采光差
		镀膜玻璃		
20 世纪 90 年代	高效节能舒适	低辐射玻璃	1.8	绝热、采光性能进一步改善
21 世纪	智能化	智能玻璃		更好的解决采光与隔热问题

表格来源：付祥钊：夏热冬冷地区建筑节能技术，北京：中国建筑工业出版社，2002

近年来，随着全世界对建筑节能的广泛关注，建筑围护结构的热工性能得到了很大的提升，气密性也随之提高，但同时也减小了通过空气渗透以及泄漏得到的新风量，人们对室内空气品质的不满意度也在节节攀升，尤其是严寒地区的冬季，为了节约供热量，牺牲了室内的通风，污染物不能及时排出，使得人们在室内有时感觉非常不舒适。很多学者和研究者对窗户的通风性能都进行了研究和改造。

对于有新风系统的建筑，通风能耗所占比例越来越高，不过对于这类建筑，虽然新风能耗增加了，但实施起来并不难。相比而言，对于既有建筑，尤其是小型办公建筑、住宅建筑、敬老院等未安装全新风或半集中式空调系统的小型建筑，气密性已经很高，而如果再安装带有热回收的机械通风系统又太过昂贵和复杂。一般而言，外窗和通风系统是两个独立的系统。其实如果将两者结合，成为一种新型的可以带有一定通风功能的外窗，或者用一种生动的说法，即“呼吸窗”。

对于新型通风窗，不仅希望其具有一定的通风换气功能，更希望其具有节能

的意义。从人们对于窗户这种围护结构的使用习惯来说，冬季由于室外气温较低，人们只会自发的阻止室外空气流入室内而不会开窗通风，在不开窗的情况下，引导空气流入室内必须为空气提供动力，动力源分为机械动力以及自然动力。

1.2 呼吸窗国内外研究现状

1.2.1 国内研究现状

据了解，人们每天会花费 70%-90%的时间呆在室内环境中，老年人、病人以及儿童更是如此，不良的室内环境质量直接影响到室内人员的健康^[4]。由于建筑节能的呼声越来越强烈，严寒地区窗户的密闭性也得到专业人员的不断研究，导致了冬季室内空气流动缓慢，新鲜空气由于低温而被人们有意阻止进入室内，因此人们在冬季室内生活的舒适性大打折扣。目前常用的通风方式主要有机械通风与自然通风。在美国，ASHRAE 对所有住宅建筑都做了配备机械通风系统的规定，“在每个房间设置送风机或送风散流器，再通过渗透风或机械排风平衡室内的气压”^[5]。在我国对居住建筑还未有相关的要求，如果在居住建筑安装了机械通风装置，那么机械通风产生的电耗将需要居民个人承担，因此此种机械通风的方法目前国内还不能普遍推广。

近年来，国内科研人员都更加深入地建筑呼吸窗的研究，但由于我国对节能窗领域的研究起步较晚，因此国内的研究内容尚少。曾臻等人总结不同太阳高度角下双层皮热压自然通风的通风量和温度分布规律，分析双层皮空腔内热压自然通风的气流形态，他们对双层皮幕墙自然通风的实验测试方法进行研究，建立了在不同太阳高度角下针对太阳辐射强度，通风量，温度分布的实验测试方案。他们针对双层皮幕墙热压自然通风工况进行了测量，积累了多种工况的实验数据，总结了不同太阳高度角下双层皮热压自然通风的通风量和温度分布的规律，以此作为验证模拟计算准确性的依据；根据曾臻等人的测量结果，可定量分析进入幕墙的太阳辐射热量的能量流向，即通风排热量、对流换热量、长波换热量和短波透射量、反射量的比例关系，从而能够全面定量分析幕墙的遮阳、通风及隔热性能，测试结果显示，在多种太阳高度角下，本实验的外呼吸式双层皮幕墙在热压驱动下都具有良好的通风排热和遮阳隔热的效果；曾臻等人通过对实验的分析发现，空腔内的气流不是单纯的自下而上的热浮生流动，而是时有涡流的存在，涡流是阻碍自然通风换气的重要因素，因此在模拟计算中不宜采用简单的“活塞流”来处理和分析双层皮系统的自然通风^[6]。吴蔚等人以夏热冬冷地区典型城市南京

为例, 通过 DeST-h 模拟软件, 探讨不同居住建筑外窗的最佳传热系数和遮阳系数^[7]。对呼吸窗领域的研究, 不仅限于研究机构与人员, 一些企业也参与进来甚至做出了试探性的产品。如嘉寓集团开发了智能呼吸窗, 其最大特点是在不开窗的情况下也可以透气, 将开窗问题的能耗大, 污染大, 噪音大三大问题的解决方案融于产品中, 实现了窗户本身采光、透气的功能, 并避免了其负面效应。其开发的智能呼吸窗一般采用低电压供电系统, 以微型气泵实现大循环空气对流, 达到不开窗就能净化室内空气的作用, 但该种智能呼吸窗的效果有待观察, 虽然理论上效果显著, 但实际效果并不理想。王振^[8]实测了某双层皮幕墙的朝向、遮阳、开口方式、淋水等策略对双层皮保温隔热效果的影响, 但实验测点过少, 且未对双层皮系统的温度分布和通风量进行测量, 并且研究内容局限于对流传热量。王强等^[9]实测了双层皮幕墙与单层幕墙、双层皮幕墙带通风与不带通风等多种工况, 比较了内玻内表面的温度差异, 验证了双层皮幕墙的节能效果, 但实测测试参数仅有内玻温度, 较为单一。贴日丽^[10]发明了半封闭式居民住宅换气窗。此种换气窗实际也是用了自然通风的原理, 换气窗的结构很简单, 但加装了一些通风的设备以及控制器, 另外, 在窗玻璃的选择上也选用了较为昂贵的隔热玻璃, 从而使得成本大幅提升, 因此, 在成本方面仍需要做出改善。

裴刚^[11]等人曾在香港开展过太阳能通风窗的实验研究。太阳能通风窗是以 Etzion Y 提出的可逆转自然通风双层窗为基础进行适宜的结构改造, 如图 1, 其实验目的是测量通风窗减少室内得热的效果, 并且与普通单层窗、自然通风双层窗、机械通风双层窗进行对比实验, 并根据香港地区——亚热带气候的特点开发出新双层通风窗的运行模式。作者在 2007 年 4~8 月分别对 3 种窗户的性能分别进行了多次对比测试, 最终选取了 7 月 10 日, 12 日、14 日这 3 天的数据作为分析样本, 这 3 天的实测气象数据最为接近, 便于不同窗户之间的性能对比。结果显示单层窗得到的太阳辐射量最多, 单层吸热玻璃的温度可高达 42℃, 比环境温度高出近 10℃, 而自然通风窗可明显减低空调系统的冷负荷以及能耗。相对于单层窗, 在亚热带气候的夏季这样的气候条件下, 自然通风双层窗可以减少室内得热的 38%, 而机械通风双层窗可以减少室内得热的 62%, 因此太阳能通风双层窗可以明显减少室内得热, 降低能耗, 且对自然采光影响不大, 结构简单, 工艺方便, 因此前景较好。并且在严寒地区选择吸热玻璃可以使玻璃温度与环境的温度之间的温差达到很大, 更加有利于自然通风, 从而改善冬季室内的通风情况。

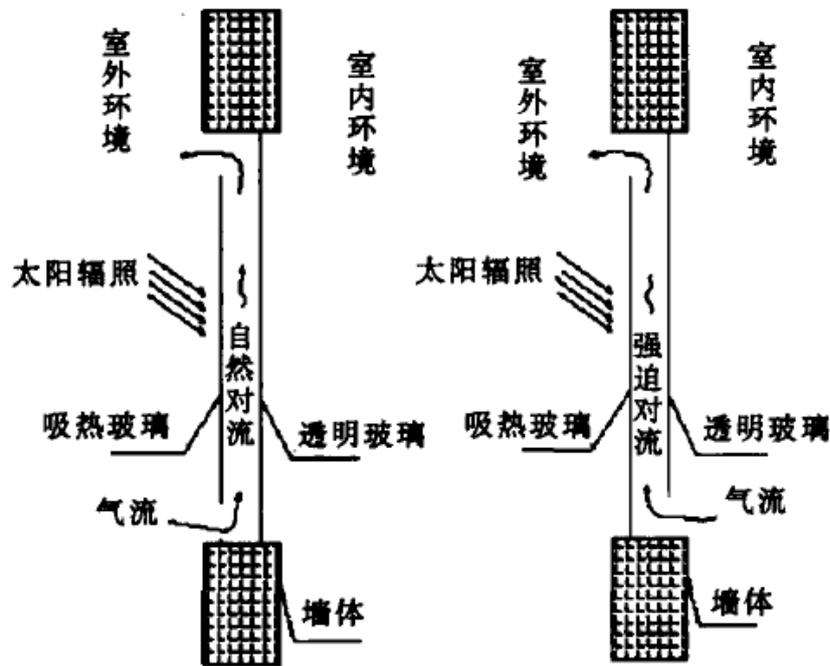


图 1 太阳能自然通风双层窗（左）以及机械通风双层窗（右）

陶爱荣^[12]将热管技术与呼吸窗技术结合在了一起,发明了一种冬夏季都可以进行自然通风的节能通风窗,但是窗户的结构较为复杂,它在传统呼吸窗的内外层百叶之外还增加了若干微型直流风扇来控制气流走向,另外还有一套分离式热管对室外新风以及室内排风进行热回收。如此的结构需要很大的宽度空间,并且热管技术使用寿命短,且造价高,普通的居民并不会选择这样的产品;再次,这样的复杂机械结构会产生不小的噪音,也成为了其一大缺陷。

欧阳沁、朱颖心^[13]曾研究过一种气窗,它将一面窗分成三个大小相差悬殊的部分,条形小窗可以推动,与本体大窗形成上下两条缝隙,缝隙宽 0.03 米,长为 0.8 米,两条缝隙高差为 1 米,室内外气温分别为 20℃和 0℃时,仅靠热压的作用即可产生 16.1m³/h 的通风量,这个量对于冬季的自然新风要求来说已经非常可观了。不过,这个在严寒地区不具有可操作性。其一,严寒地区室外温度过低,并不适宜直接送入室内,因为会引起人的冷感;另外,同一面外窗又分出大小两扇窗,平添了很多渗风的风险;再次,高温空气低速流出窗户缝隙时易发生结露。

1.2.2 国外研究现状

20 世纪 90 年代，国外首次提出将机械通风技术与窗户结合，至今仍然不断有新的通风窗结构与形式出现在市场上，机械通风窗的应用场合也从商业建筑逐渐扩展到居住建筑^[14]，只是在居住建筑市场中的应用不及商业建筑广泛。自然通风窗在结构上来说更为简单，且造价低廉，缺点是通风量不宜控制，因此更多的情况是以自然通风为主，机械通风为辅的通风方式。从通风窗的空气流动方向来说，目前在市场上与研究领域主要出现的方式有五种：送风窗、排风窗、室内侧空气幕帘、室外侧空气幕帘^[15]以及最新的双向通风窗。

近 30 年来，有关窗户的技术研究已经发展到了很高的水平^[16]。利用双层玻璃的夹层进行高层建筑整体通风的双层皮玻璃幕墙在中欧地区已经得到了越来越广泛的使用。不过双层幕墙虽然通风效果好，但并不适用于居住建筑，因为欧洲居民的建筑层高较低，建筑的外立面并没有足够的空间，从而，结合双层幕墙与窗户的结构而提出的具有通风功能的双层窗的设想。

理论研究方面，Gian Vincenzo Fracastoro^[17] 等人对开窗情况下的自然通风进行了数值模拟与实验研究，得出了简化表供设计人员快速计算开窗时的通风量，证明通过数值模拟和实验研究方式可以较为准确的描述自然通风情况。David Applefeld 和 Svend Svendsen 利用热箱做了一组实验来确定呼吸窗的传热性能。他们在不同边界条件下进行了测试，并给出了对呼吸窗的热平衡的描述，澄清了其热工性能评估的方法。他们进行的实验对比了带有通风的外窗以及不带通风的外窗与室内的热平衡，揭示了通风窗具有巨大的节能潜力。此外，他们发现在外窗的窗框结构也有很大程度上的热回收，这个现象可以帮助整个通风窗热回收的效果，不过会增加额外的热量损失。他们通过将外窗暴露于 8 种不同气流速度，以及恒定的环境温度（20K）的情况下对通风窗进行了实验分析，确定了不同通风量下空腔内空气的预热量，发现呼吸窗的热回收效果会随着空腔内气流流量的增加而降低，当气流流量超过 6L/s 时，呼吸窗的热回收效果几乎发挥不了，文章还提出评估呼吸窗热工性能的理论方法^[18]。

当一栋建筑的周围有风时，会在背风区域形成湍流涡旋风。在这个湍流区域，会促进新风和回风之间的混合，从而减弱热压效应形成的温差。因此，当有风时，气流交换会降低很多。虽然目前已经有一些研究其关联性的实证研究是关于风压和热压组合造成的气流组织情况，但是这些关联性的研究并未考虑背风面的气流减少的情况。对此，Marcello Caciolo 等人用 CFD 模拟了住宅建筑位于迎风面和背风面的外窗，其烟囱效应与风压二者的影响比重以及随风速的变化，模拟结果表明，在风速较低的迎风面区域，热压效果占主导，当风速提高时，二者的效

果呈现出这样的趋势：不管是迎风面还是背风面，当室外风速提高时，窗户开口处的热压效果会降低，并且背风面降低的更快，当开口附近风速高于 5m/s 时，热压效果已经消失^[19]。

Jorge S.Carlos 等人做出了一个 2.2×2.0×2.5 米的实验室箱体，如图 2，其中在南向开了一个 1.43m×1m 的开口用来安装外窗。实验室位于北纬 40° 20'，东经 7° 21'，海拔 464m，位于葡萄牙中心的山区。实验箱体的外窗本位普通的两层窗，后在外层窗户的底部以及内层玻璃的顶部各开一个缝隙，从而改造为双层呼吸窗，包括两层玻璃构成一个空腔，外层玻璃为单层白玻，内层玻璃为双层玻璃。实验时间从 2008 年 11 月至 12 月。Jorge S.Carlos 等人做此实验的目的是为了考察实际的气候条件对呼吸窗系统的影响。改造后的外窗即具有通风的作用，室外的空气经由外层玻璃底部的缝隙进入空腔，在空腔内上升，再经内层玻璃顶部的缝隙进入室内，从而达到通风换气的作用。实验结果发现该呼吸窗系统可作为一个很有效的热交换器，利用室内散到室外的热量以及太阳辐射得热加热空腔后，从而降低制热季节的运行能耗。在空腔内测得气流流量约为 19m³/h，温升约为 6℃。实验数据表明呼吸窗系统是一个很简单有效的节能技术，可以用在新建建筑和既有建筑^[20]。



图 2 实验室箱体外形

双层玻璃目前在葡萄牙的住宅建筑中由于其阻挡空气渗漏以及提高热舒适的功能而作为一种广为接受的建筑系统。Jorge S. Carlos 等人根据传热方程建立数学模型，将实验箱体置于葡萄牙中部的山地地区，对双层通风窗在各种不同参数下的热工性能进行预测，通过改变空腔中的气流速度，室外气温以及太阳辐射来预测温升以及进入室内的新风中可以利用的热能，并将其结果与其他软件模拟模拟结果以及实测结果进行了对比^[21]；

目前，模拟带有双层皮幕墙建筑的全建筑能耗的工具具有很多，如 esp-r, EnergyPlus, TRANSYS, TAS, IES VE, IDA ICE, VA114, BSim 等等；这些工具用于模拟传统的建筑系统或者全建筑的能耗都是非常适合的，但这些工具是否能够准确模拟双层皮幕墙的复杂三维传热传质情况还有待考察。Deuk-Woo Kim, Cheol-Soo Park 通过实验测得空腔内气流情况以及双层皮幕墙的热工性能，并用

EnergyPlus 对双层皮幕墙系统进行了模拟, 通过对比实验与模拟结果, 作者发现当用 EnergyPlus 模拟双层皮幕墙时, 有很多因素都可能导致模拟结果与实际结果千差万别, 但若小心处理这些影响因素, 并对 EnergyPlus 的模型进行适当的修正, EnergyPlus 也不失为一个很好的模拟双层皮幕墙结构中的传热传质情况的工具, 并将这一说法进行了验证^[22];

K.A.R. Ismail 和 J.R. Henri´quez 针对双层通风玻璃窗提出一种数学模型并给出了对双层通风窗进行数值模拟的结果, 入射的太阳辐射加热夹层空腔中的空气, 使这些空气在自然浮升力的作用下形成一股上升气流。双层通风窗的二维模型是在质量、动量以及能量守恒的基本方程的基础上建立的, 所涉及到的常数以及随时间变化的边界条件通过有限差分法以及 ADI 网格求解, 数值网络以及时间增量在求解中得到优化, 并且数值结果也通过可以得到的数据得到了验证; 通过改变两层玻璃之间的间距以及入射的太阳辐射条件可以得到不同的温度场, 实验同时得出了这样的结论: 两层玻璃之间的间距对太阳得热系数的平均值以及平均遮阳系数几乎没有影响^[23]。

Pablo La Roche 和 Murray Milne 给出了利用室外空气通风冷却的最近控制策略并且量化了在此策略下热惰性以及窗户尺寸对室内舒适度的影响程度^[24]。

Juan Zhou and Youming Chen 给出了双层皮幕墙对夏热冬冷地区的适用性问题以及影响节能效果的一些因素, 对于夏热冬冷地区, 其白天强烈的太阳辐射以及夜间很低的风速这些因素不利于双层皮幕墙节能效果的发挥, 并给出双层皮幕墙应用于中国夏热冬冷地区的一些优缺点^[25]。龙惟定等人将 DSF 与单层玻璃幕墙以及普通墙体的供热、供冷能耗进行对比, 发现气流排热对 DSF 传热影响很大, 排热量随着气流速度的增大而增大; 而夏季 DSF 室外温度往往低于空腔内温度, 有一部分热量是从内向外传递, 传热量与气流速度负相关。总体而言, 气流的存在使通过对流进入室内的热量降低了^[26]。Jorge S. Carlos 以及 Helena Corvacho 等人分析了呼吸窗在冬季应用时, 从室内逃出的热量对空腔的加热量以及室外太阳辐射对空腔的加热量两者的比重, 结果发现太阳辐射给空腔带来的加热量占了很小的比重, 并且一天 24 小时中, 有太阳辐射的时间很短, 而呼吸窗作为热回收装置的效果却不分时间段; 在自然呼吸窗作为被动式热回收装置时, 其受到两种作用的影响, 其一是太阳辐射的强度, 其二是回收室内通过玻璃逃逸出来的热量, 他们通过在真实环境下测试二者的作用大小, 发现太阳集热的影响只占一小部分; 这是因为呼吸窗的材料是透明的, 因此大部分的太阳辐射能够穿过玻璃达到室内, 从而弱化了其收集太阳能热量的作用, 并且, 太阳辐射只在一天中的某些时段有, 而夜间或者阴雨天都没有或者很少; 而相比之下, 回收室内

逃逸热量的作用是时刻都可以进行的,甚至在太阳能集热作用不能发挥作用的夜间,回收热量的作用反而能够发挥更大的作用^[27]。Jingshu Wei 以及 Jianing Zhao 等人通过 EnergyPlus 建模以及实验手段对 5 种不同机械通风方式下的呼吸窗的节能效果进行比较,文章通过实验测得水平方向、垂直方向及深度方向的温度,说明垂直方向温差最大,解释了文章采用的二维模型的合理性^[28]。Jingshu Wei 以及 Jianing Zhao 等人建立了 dual airflow 呼吸窗的模型,并模拟其在中国地区 5 种气候区域的节能效果,并将其与传统窗户进行对比,优化了 13 种几何参数,发现室外空气通风速率、窗户高度、太阳得热系数、窗户朝向是最重要的参数^[29]。

N.K.Bansal^[30]对太阳能烟囱进行了模拟实验研究。这种太阳能烟囱外形与欧洲地区取暖的排烟烟囱外观相似,烟囱的四壁采用玻璃作为材料,最大限度的吸收太阳能以增加室内的烟囱效应,故此得名。实验数据显示,太阳能烟囱内的空气流速可达 0.24m/s,对于增强室内的通风起到了很好的效果,但作者的实验是在炎热的季节开展的,故此对寒冷季节未能进行有力的论证。

1.2.3 本论文研究内容

据统计资料显示,我国建筑物通过窗户散失的能量约占建筑总耗能的 50%,具有巨大的节能潜力,提高窗户的热工性能是建筑节能最经济有效的方法。

另一方面,以前的住宅窗户因气密性及保温性能不佳设计得比较小,只考虑必要的采光、通风和日照。随着人们观念的改变,对室内空间质量与景观的要求日益增高,同时还有建筑立面设计的考虑,如今的窗户设计得越来越大,有的甚至占了一整面墙,追求通透、宽敞、明亮的效果。这一窗户设计的趋势对窗户自身的节能性能提出了更高的要求。

外窗对于建筑的能耗有着举足轻重的作用,特别是当外窗还承担着为室内提供新风的功能时,通过外窗传递到室内的热(冷)负荷都会很大程度上影响着建筑的能耗。呼吸窗这种新型的节能型外窗就是在此基础上建立起来的,其原理类似于双层皮幕墙,通过空腔内的空气流动达到节能的效果,详见下文呼吸窗原理。本文主要使用 EnergyPlus 对该种节能呼吸窗建立模型,得到模拟数据,并通过实验验证的方法验证其节能性。

第 2 章 遮阳被动式节能呼吸窗及其数学模型

2.1 呼吸窗的结构

对于没有安装带有新风的空调系统的建筑来说，窗户不仅承担着照明及提高视觉舒适度的任务，更加要承担为室内提供新风量的重任。但如果将外窗直接打开，又会使得室内环境受到室外风霜雨雪的影响，并且在夏季室外的潮湿炎热的风以及冬季室外寒冷的风吹入室内，还会对室内人员造成吹风感，增加不适。在前人对呼吸窗研究的基础上，本文提出另一种呼吸窗，ST_S（Smart Solar Transparent Shutter）。ST_S系统是安装在传统外窗外侧的一套装置，它可以实现 2 个主要的功能。首先，ST_S系统可以满足在对外窗有一定遮挡的情况下，向室内补充一定的新风量。其次，ST_S系统可以通过形成空腔和在空腔内加遮阳设施（夏季）提高外窗的热工性能。

理论上讲，ST_S系统的结构相对来说比较简单，如图 3 在传统外窗的外侧再安装一层玻璃，使得内外层玻璃之间形成一定的空腔，原理类似于双层皮幕墙，ST_S系统这样的结构使得它既可以用于既有建筑，也可以用于新建建筑。

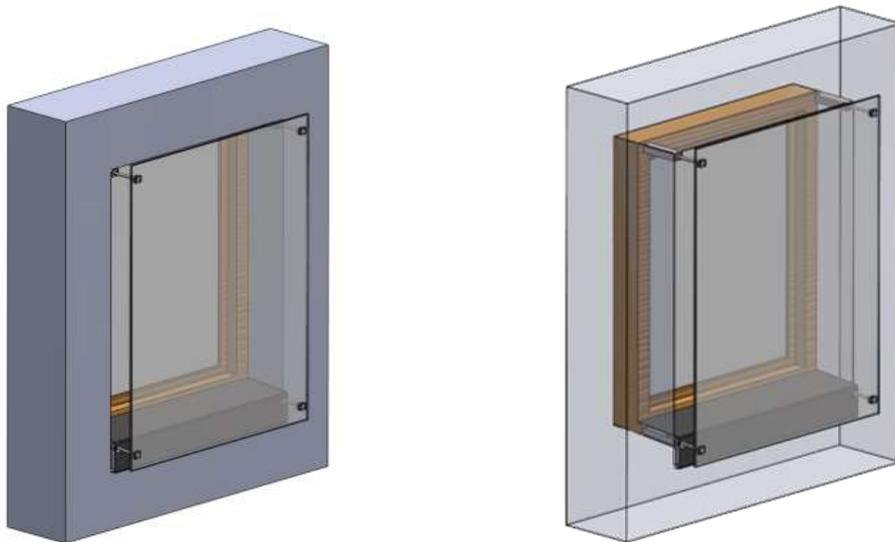


图 3 ST_S呼吸窗的结构

2.2 呼吸窗的原理

影响 STS 系统空腔内部气流组织及传热性能的因素主要有两个：烟囱效应以及外界环境（风压系数、风速、风向等）。在夏季，外窗开启方式为上悬（如图 4 右图），底端固定，但底端留有一定的空隙，空腔内装有遮阳百叶，空腔内的空气流动可以带走遮阳百叶吸收太阳辐射的热量，避免了内遮阳向室内的传热，也避免了外遮阳长期暴露在室外条件容易损坏的情况；室内热空气受到热压作用上升到房间的顶部，并从顶部开口流出室外；在冬季（如图 4 左图），窗户开启方式为下悬，外窗顶端固定，底部可以打开一定距离（0-20cm），与夏季模型不同的是，外窗下悬时，顶部不留空隙。空腔内的空气同样受到热压以及风压的作用，沿着空腔上升，这样，室外冷空气经过空腔预热后顶部开口进入室

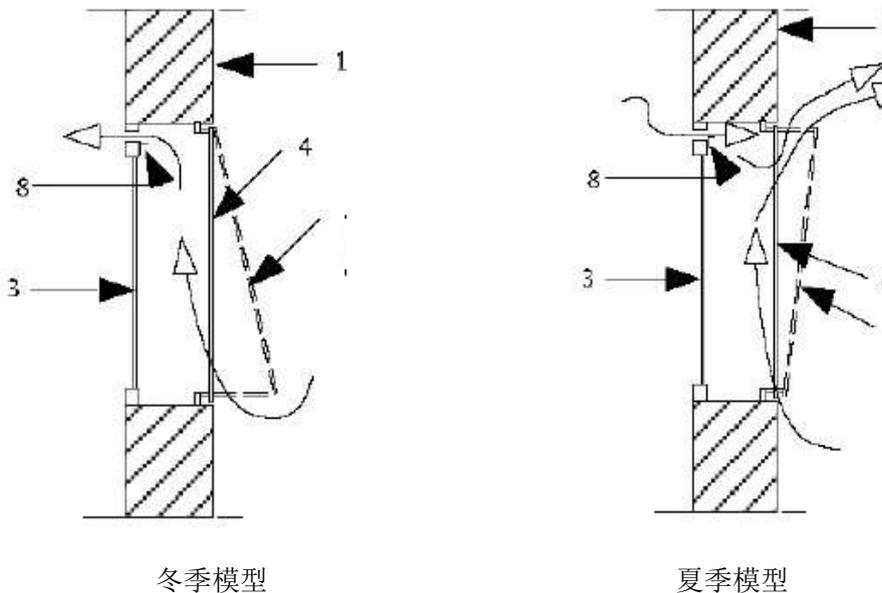


图 4 STS 呼吸窗原理图

内。这样，避免了冬季直接受到室外冷空气的侵入，又可以充分回收利用外窗向室外环境的散热，从而达到节能与通风的目的。总体来说，在冬季，该种节能呼吸窗的节能性体现在原本直接侵入室内的室外冷风，经由被加热的空腔后预热进入室内，从而降低了冷风侵入引起的热负荷，从而达到节能的目的。因此，室内的冷风侵入引起的热负荷越大，该种窗户的节能性应越大。

2.3 气流组织分析

2.3.1 空腔内的气流

空气在温升浮力以及风压作用下在空腔中流动产生气流。浮力是由于空腔内的空气以及空腔外的空气的温度差产生的，这种作用将会使得空腔内的空气上浮。风压作用在空腔的气流入口及气流出口产生压差。在很多情况下，风的作用并不一定导致气流流动，气流的流动要在足够大的热压作用以及风压的作用下才会产生，气流流动的动力可由下式表达：

$$\Delta P_{\text{tot}} = \Delta P_{\text{stack}} + \Delta P_{\text{wind}} \quad (1)$$

其中 ΔP_{tot} 是总的压差。 ΔP_{stack} 是由热压引起的压差， ΔP_{wind} 是由风压造成的压差。

气流的流量估算公式为：

$$V = C_d A_{eq} \left[2 \frac{\Delta P_{\text{tot}}}{\rho} \right]^{0.5} \quad (2)$$

其中，

V ——体积流量 (m^3/s)

C_d ——流量系数，在模拟中取 0.83

A_{eq} ——开口的当量面积 (m^2)

当有不止一个开口时，当量面积可由下式计算：

$$\frac{1}{A_{eq}^2} = \frac{1}{A_{op1}^2} + \frac{1}{A_{op2}^2} + \dots + \frac{1}{A_{opn}^2} \quad (3)$$

2.3.2 热压效应

在相邻的空间内若空气存在温差，那么会引起相邻空间之间的热压作用并形成气流。在自然情况下，这种自然对流的趋势是热空气上浮到高度较高的区域，冷空气下沉到下部区域。当顶部和底部的开口都打开时，一个开口靠近上部空间，一个开口靠近下部空间，那么就会形成热空气上浮到顶部的开口离开而冷空气从底部的开口进入。在每一个开口都会有不同的压差，因此由于热压作用引起的总压差可以由下式表示：

$$\Delta P_{\text{stack}} = \Delta P_{op1} + \Delta P_{op2} + \dots + \Delta P_{opn} \quad (4)$$

其中， ΔP_{op1} 表示在开口 1 处的由于热压作用产生的压差 (Pa)，以此类推。

每一个开口的压差为：

$$\Delta P_{opn} = \Delta \rho g H \quad (5)$$

其中, $\Delta\rho$ 表示开口处临近空间的空气密度差(kg/m^3), g 为重力加速度(m/s^2), H 表示开口的相对高度。

2.3.3 风压效应

建筑周围的风力作用会在建筑的周围产生压力差从而引起空气的流动。在建筑表面, 迎风面的风压为正, 背风面的风压为负。空气从位于迎风面墙体的开口进入, 然后从背风面流出。风压产生的空气流动收到下列因素的影响:

- 风速以及风向;
- 建筑所处地理位置以及周围的环境;
- 建筑的外形;

由于风压造成的压差数学表达式为:

$$\Delta P_{\text{wind}} = 0.5(C\Delta P_{\text{op1}} - C\Delta P_{\text{op4}})\rho v_{\text{wind}}^2 \quad (6)$$

其中, $C\Delta P_{\text{op1}}$ 以及 $C\Delta P_{\text{op4}}$ 分别表示在开口 1 和开口 4 处 (如图 5 所示) 由于风压引起的压力系数, 即风压系数。 v_{wind} 表示风速。

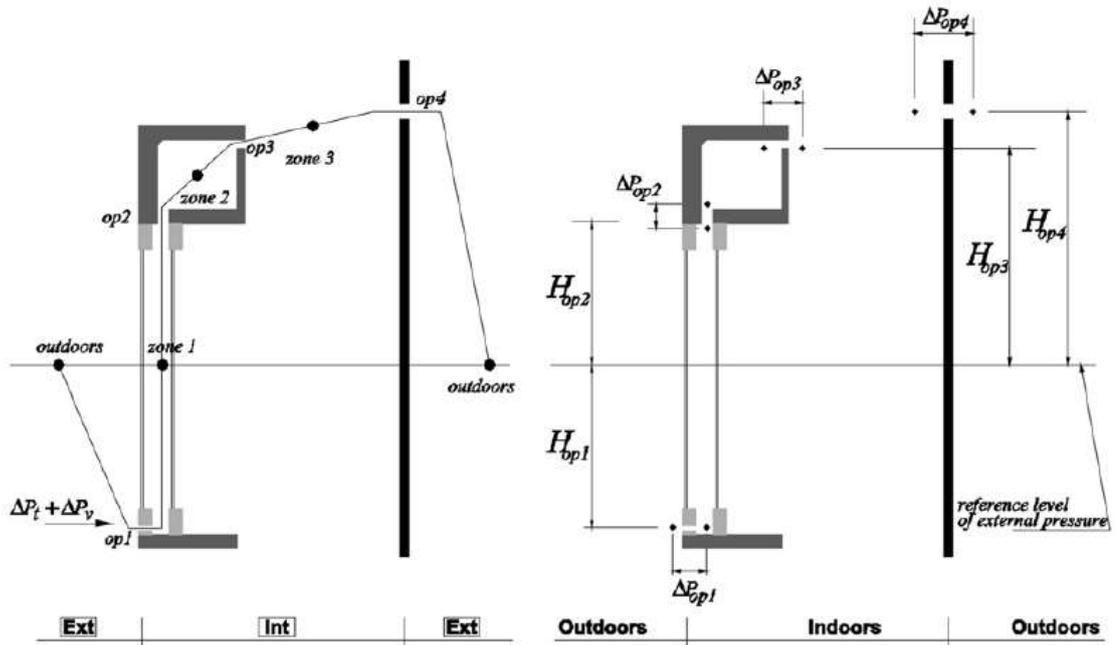


图 5 每个开口的压差示意图

呼吸窗的传热模型简化为二维非稳态层流不可压缩的气体流动。传质方程可写成:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

方程中 x 与 y 的方向可以写为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - g \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (8)$$

在式 (2) 和式 (3) 中的压力项可以用两部分来表达，一部分是由于在 x 位置的静压力，另一部分是由于流体的动量 P_m ，因此可以写成：

$$p = p_m - \rho_{\infty} g x \quad (9)$$

分离 (4) 中的 x 和 y 方向，可以改写为：

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p_m}{\partial x} - \rho_{\infty} g \quad (10)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p_m}{\partial y} \quad (11)$$

将 (5) 式和 (6) 式代入 (2) 和 (3) 式得到：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_m}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - g \left(\frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho} \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_m}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (13)$$

Boussinesq 近似可以写成如下的形式：

$$\rho - \rho_{\infty} \cong -\rho\beta(T - T_{\infty}) + .. \quad (14)$$

将 (9) 式代入 (7) 式可以得到：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_m}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g\beta(T - T_{\infty}) \quad (15)$$

不带粘性耗散项的二维非稳态能量方程可以写成：

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uT) + \frac{\partial}{\partial y}(vT) = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho c} \frac{\partial I}{\partial y} \quad (16)$$

方程 (11) 中的 $-\partial I / \partial y$ 用来计算被空腔吸收的太阳辐射。当将能量方程用于气流区时，源项 $-\partial I / \partial y$ 将变为 0，因为气流被认为是非参与截止因此对于太阳辐射是可以透过的。

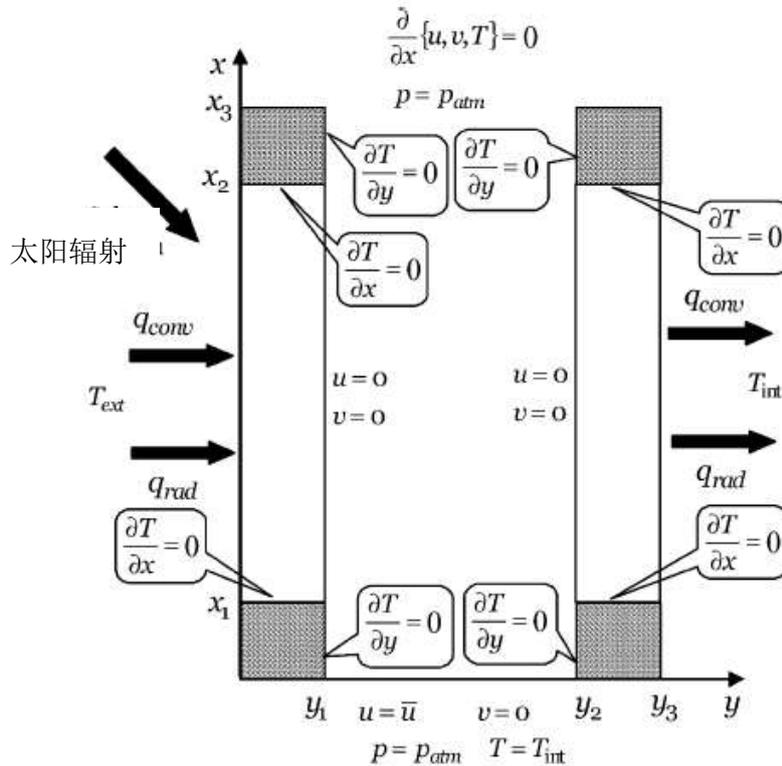


图 6 气流模型以及相应的边界条件

2.4 传热模型分析

2.4.1 呼吸窗内部的传热

呼吸窗中很重要的一个问题就是当空气在空腔中流动时与建筑之间的换热。空腔由两块玻璃之间形成的缝隙组成。对于玻璃的加热主要来自两方面的热量，一部分为入射的太阳辐射得热，一部分来自室内的散热，这两部分的作用将会通过自然对流加热空腔中的气流^[31]。该模型采用了一些经验关系式来估算对流以及辐射传热。在建模的过程中用到的假设包括：呼吸窗中空腔的传热模型为二维传热；表面的温度是一致的；空腔内部的气流是均匀的；空腔的轮廓是绝热边界。

2.4.2 呼吸窗与周围环境的传热

呼吸窗与周围环境的传热是由于玻璃的内表面以及外表面的对流以及辐射传热引起的。与室内及室外环境的对流传热的数学表达式为：

$$Q_{c-out} = Ah_{c-out}\Delta T \quad (17)$$

以及

$$Q_{c-in} = Ah_{c-in}\Delta T \quad (18)$$

其中, Q_{c-out} 以及 Q_{c-in} 为呼吸窗与室外环境以及室内环境之间对流传热的热量 (W), A 表示呼吸窗与室内外环境的传热面积 (m^2), h_{c-out} 与 h_{c-in} 为呼吸窗与室内外环境对流换热的对流换热系数 ($W/m^2.k$), ΔT 为呼吸窗与室内外环境接触表面与环境间的温差 (K)。

与周围环境的辐射换热的数学表达式为:

$$Q_{r-out} = Ah_{r-out}\Delta T \quad (19)$$

以及

$$Q_{r-in} = Ah_{r-in}\Delta T \quad (20)$$

其中, Q_{r-out} 以及 Q_{r-in} 为呼吸窗与室外环境以及室内环境之间辐射换热的热量 (W), h_{r-out} 与 h_{r-in} 为呼吸窗与室内外环境辐射换热的对流换热系数 ($W/m^2.k$)。

2.4.3 空腔内部的传热

在空腔内部, 存在玻璃之间的辐射换热以及玻璃与气流之间的对流换热。两层玻璃之间的辐射换热的数学表达式为:

$$q_{r-ch} = \frac{\delta(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad (21)$$

式中:

q_{r-ch} ——单位面积的辐射换热量 (W/m^2)

δ ——斯蒂芬玻尔兹曼常数 ($5729 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)

T_1, T_2 ——与室内外环境相接触的空腔表面的温度 (K)

ϵ_1, ϵ_2 ——与室内外环境相接触的空腔表面的发射系数

F_{12} ——一个表面之间的角系数, 这里取 1

A_1, A_2 ——辐射表面的面积 (m^2)

因此, 空腔内部的对流换热系数可以得到:

$$h_{r-ch} = \frac{\delta(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1-\epsilon_2)A_1}{\epsilon_2 \cdot A_2}} \quad (22)$$

玻璃与空腔中流动的气流之间的对流换热为:

$$Q_{use} = A_{w1} h_{c-ch} \Delta T_{w1} - A_{w2} h_{c-ch} \Delta T_{w2} \quad (23)$$

其中,

Q_{use} ——玻璃传给气流的有效热量 (W)

A_{w1} 与 A_{w2} ——玻璃的内表面与外表面的面积 (m^2)

h_{c-ch} ——空腔内的对流换热系数 ($W/m^2.k$)

$\Delta T_{w1}, \Delta T_{w2}$ ——玻璃内表面与室内环境的温差以及玻璃外表面与室外环境

的温差 (K)

通风空腔内的对流换热系数可从 ISO15099 得到^[32]:

$$h_{r-ch} = 2h_c + 4v_{air} \quad (24)$$

其中,

h_c ——不通风的空腔中的对流换热系数 ($W/m^2.k$)

v_{air} ——空腔内的平均气流速度 (m/s)

自然状况下, 气流速度对空腔内的对流换热系数有着很大的影响, 根据^[33]的实测数据, 空腔内气流横截面的流速从 0.03~0.09m/s 时, 对应的对流换热系数为 2.8~4.3 $W/m^2.k$ 。对流换热系数 h_c 可由下式得到:

$$h_c = Nu \frac{\lambda}{d} \quad (25)$$

其中,

Nu——努谢尔特数

λ ——空气的导热系数 ($W/m.K$)

d ——换热表面间的间距 (m)

Nu 就可表示为:

$$Nu = [Nu_1, Nu_2]_{\max} \quad (26)$$

由于

$$Nu_1 = 0.0673838Ra^{1/3}, \text{ 当 } 5 \times 10^4 < Re \quad (17)$$

$$Nu_2 = 0.028154Ra^{0.4134}, \text{ 当 } 10^4 < Re < 5 \times 10^4 \quad (27)$$

$$Nu_1 = 1 + 1.7596678 \times 10^{-10} Re^{2.2984755}, \text{ 当 } Re \ll 10^4 \quad (28)$$

其中, Re 为雷诺数, 并且

$$Nu_2 = 0.242 \left[\frac{Re}{H} \right]^{0.272} \quad (29)$$

其中,

H——空腔的高度 (m), 雷诺数可以定义为:

$$Re = \frac{\rho^2 d^3 g \beta C_p \Delta T}{\mu \lambda} \quad (30)$$

其中,

ρ ——空气密度 (Kg/m^3)

d ——沿着空气路径的表面尺寸 (m)

g ——重力加速度 (m/s^2)

β ——空腔内气体的热线膨胀系数 (1/K)

C_p ——空气的定压比热容 ($J/(kg.K)$)

ΔT ——空腔表面的温差 (K)

μ ——空气的粘度 (kg/ms)

λ ——导热系数 (W/m.k)

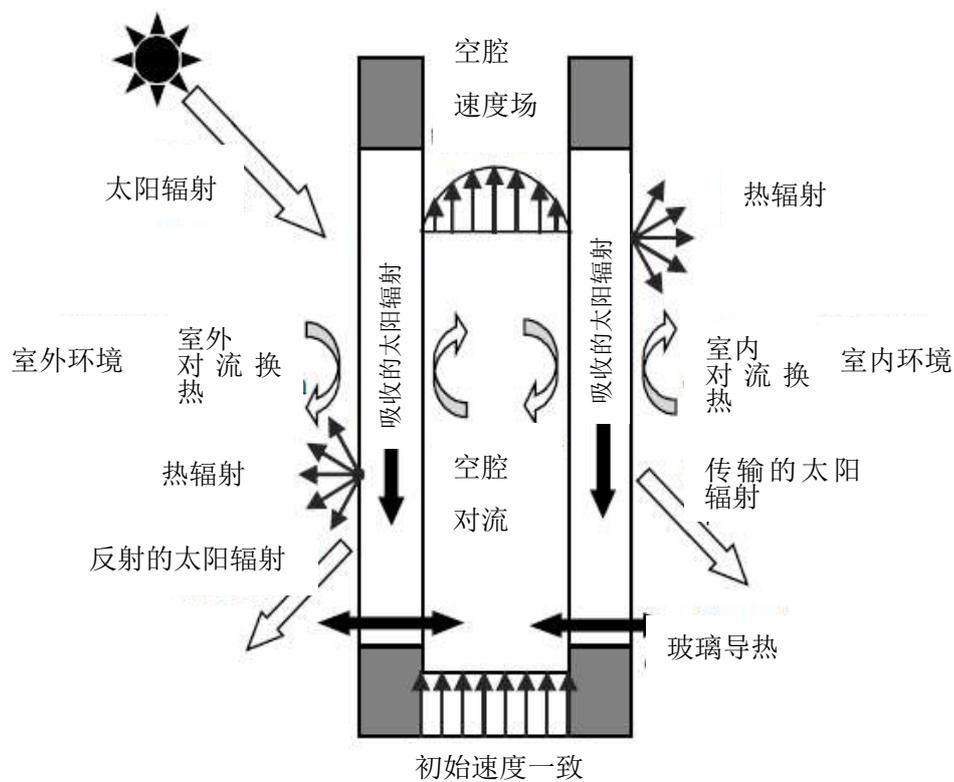


图 7 呼吸窗传热模型

第 3 章 遮阳被动式节能呼吸窗模型的建立

3.1 模拟软件的选用

3.1.1 模拟软件的选用——EnergyPlus

模拟 STS 系统的热工性能及其对 HVAC 系统的节能效果有很多种方法。一种方法是用 CFD 软件，如 Fluent, Airpak 等商业软件。国内外已有很多专家学者通过计算流体力学 CFD 方法^[3,34-38]，多区域网络模型的方法^[39-41]等方法来计算双层通风幕墙的自然通风特性并分析其热工性能，但在对众多的双层皮通风幕墙的研究归纳分析之后发现，对这种自然通风的复杂流动工况的模拟计算尚存在一些问题未得到公认的意见。CFD 虽然可以较为精确地模拟气流组织情况，并得到较为准确的各点的温度、风速等参数，但在与建筑能耗相结合以及分析对建筑冷热负荷能耗的影响等相对欠缺。相较之下，EnergyPlus 在建筑能耗模拟精确度方面则优势明显。虽然 EnergyPlus 在精确模拟气流组织方面不及 CFD 软件，但随着其发展，气流组织相关的模块也被嵌入进去，现在 EnergyPlus 中的 Air Flow Network 模块，就是专门用来模拟气流组织情况的模块。因此对于 STS 系统的模拟分析选用 EnergyPlus，其气流组织的模拟则选用其中的 Airflow Network 模块。

3.1.2 Air Flow Network 模块

Air Flow Network 模块可以用来模拟多个热分区之间的气流流动情况，如图 8 所示。该模块对气流组织的模拟包括 3 个步骤：

1. 气压及气流计算
2. 节点的温湿度计算
3. 显热/潜热负荷计算

Air Flow Network 模块所建立的模型包括一系列节点 (node)，这些节点通过气流部件 (component) 连接。因此，相较于更为复杂精确的 CFD 软件而言，Air Flow Network 模块更适用于相对简单的气流模型。对于节点来说，变化的量是压力，对于连接件 (linkage) 来说，变化的量是流量。

每个热分区 (zone) 有一个节点 (node)，两个节点之间通过 linkage 联接。如果给定风压 (自然通风) 或流速、流向 (机械通风)，Air Flow Network 模块可以通过第一步气压及气流计算确定每个节点的压力。在这个基础上，Air Flow

Network 模块可以计算出每个节点的节点温度及含湿量。利用这些节点温度以及含湿量的计算结果，可以进一步计算出每个热分区的显热/潜热负荷。

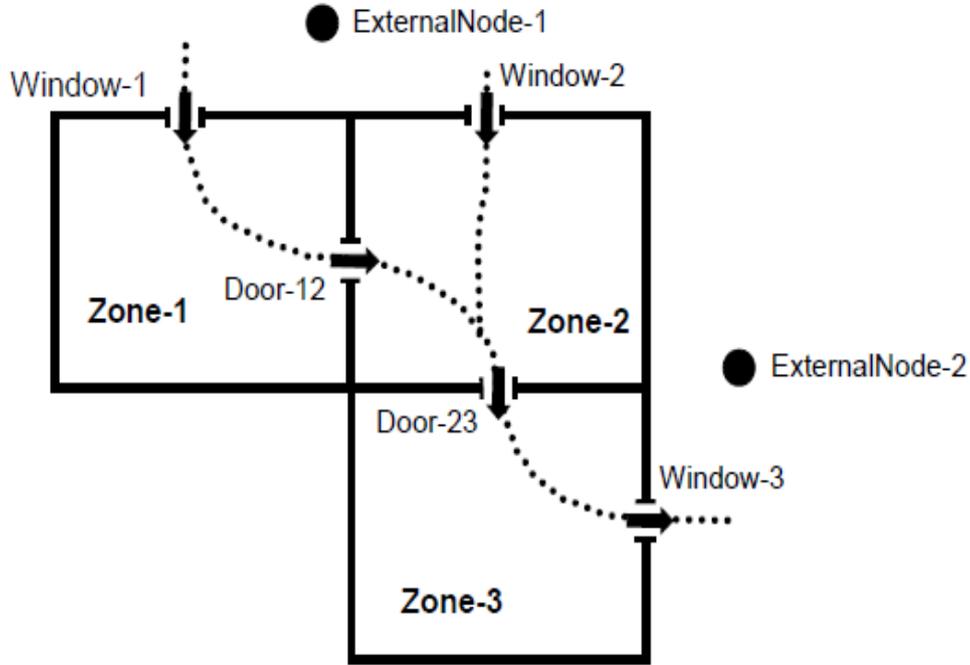


图 8 用 Air Flow Network 模块模拟所有门窗打开时可能的气流流动情况

模型中的“连接”（linkage）有两个节点（node），入口与出口节点，这两个节点由气流部件（component）连接。一个连接中的每个气流部件的压差由伯努利方程控制：

$$\Delta P = \left(P_n + \frac{\rho V_n^2}{2} \right) - \left(P_m + \frac{\rho V_m^2}{2} \right) + \rho g(z_n - z_m) \quad (31)$$

式中

ΔP = 进入节点和离开节点的全压差 [Pa]

P_n, P_m = 进入节点和离开节点的静压 [Pa]

V_n, V_m = 进入节点和离开节点的气流流速 [m/s]

ρ = 空气密度 [kg/m³]

Z_n, Z_m = 进入节点和离开节点的气流高度 [m]

对于水平开口的自然对流情况：

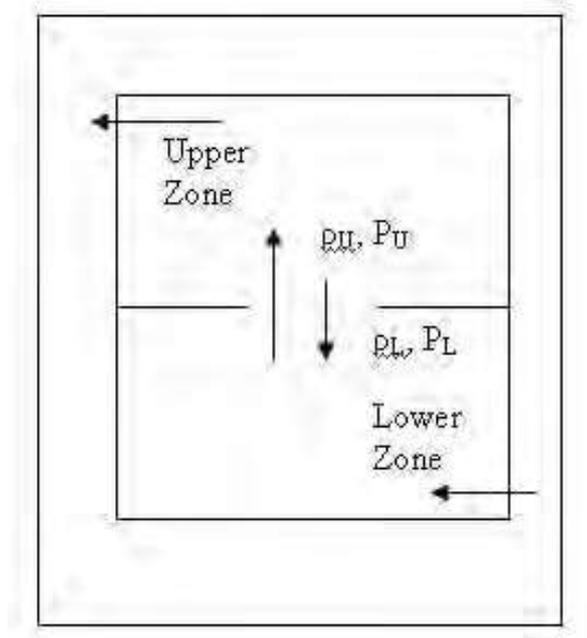


图 9 水平开口的气流组织

自然对流只发生在上部的空气密度大于下部的空气密度时。当气流是双向气流时，向上的气流等于向下的气流。下面的方程假设上部的空气密度大于下部区域，否则空气浮力引起的对流等于 0。

$$\dot{m}_{buo,max} = \rho_{ave} * 0.055 \left(\frac{g|\Delta\rho|D_H^5}{\rho_{ave}} \right)^{0.5} \quad (32)$$

式中：

$\dot{m}_{buo, max}$ = 压差引起的自然对流质量流量[kg/s]

D_H = 水力直径[m]

ρ_{ave} = 上区和下区之间的平均空气密度差 [kg/m³]

3.2 EnergyPlus 模型的建立

3.2.1 模型分区

建筑模型的能耗模拟有 EnergyPlus7.2 软件完成，所建模型是位于上海的一栋小型办公建筑的其中一个房间，几何尺寸为 4.8m×3.4m×3m，层高 3m，建筑面积 16.32 m²，建筑有一扇朝南的外窗，面积约为 2m×1.7m。由于 EnergyPlus 中模拟气流的模块 Air Flow Network 模块其计算原理是根据每个热分区一个节点，然后通过节点之间的压差进行气流组织的模拟，从而一个热分区只有一个温

度节点 (node), 因此为清楚的知道房间内部上部和下部, 以及外窗上下两部分的温度, 将室内空间以及室外空间用一个虚拟的面(以高度 2.45m 的高度为界限), 人为地将其分为四部分, 即热分区 1~4 (如图 10 所示), 分别对应室内下部和上部, 空腔上部和下部。需要注意的是, 因为 EnergyPlus 软件中在一个热分区只能有一个节点温度, 不会考虑到分区上下的温度不同, 因此这个虚拟的分隔其实并不存在, 只是为了让 EnergyPlus 能模拟出上下两部分不同的温度情况而设立。

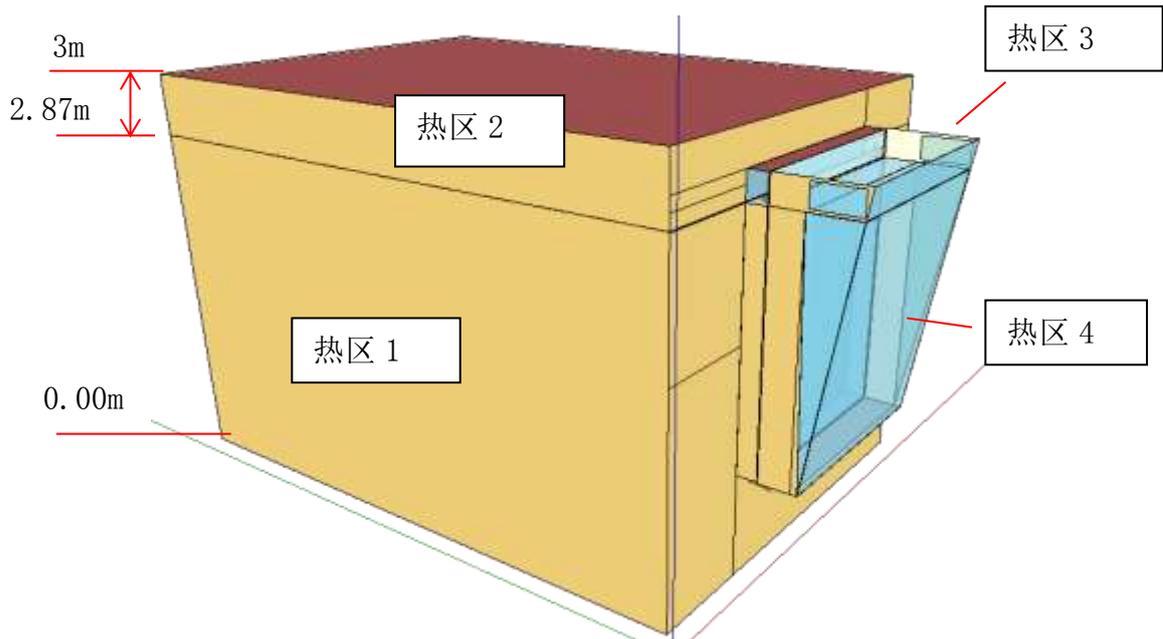


图 10 建筑模型的热分区

综上, 建筑模型共被分为 4 个热分区, 室内节点的温度通过 EnergyPlus 软件中的 Ideal Load Air System 模块控制。模型的详细设置如表 2 所示。

表 2 模型的设置

建筑围护结构的设置	
南外墙传热系数 (其他墙体设置为绝热)	0.63W/ (m ² · K)
屋顶传热系数	0.14W/ (m ² · K)
外窗传热系数	2.18 W/ (m ² · K)
外窗 SHGC	0.691
可见光透射比	0.744
空调系统的设置	

续表 2 模型的设置

设定温度	夏季 26°C/冬季 19°C
相对湿度	50%
内热源的设置	
照明负荷密度	3W/m ²
设备负荷密度	10.4W/m ²
人员密度	7.1 m ² /人

3.2.2 呼吸窗的传热系统设置

即使是最精确的气流模拟，空腔内的气流组织情况以及玻璃与遮阳百叶表面间的对流换热过程也很难准确模拟，并且详细的模型背后有许多参数都无法从现有的实证研究中准确“猜测”得到^[2,15,18,19,21,22]，这些表面的对流传热系数会随系统的结构、地理位置、周围的环境、建筑的微环境等而变化。在空腔中，随着温度的变化，遮阳百叶板的位置以及顶部及底部的开口大小而变化。可惜的是，在现有的文献中，关于这些内容的资料很有限。

在 EnergyPlus 软件中有五种计算外表面对流换热系数 (h_{out})：Simple algorithm, DOE-2, TARP, MoWiTT, Adaptive Convection Algorithm。然而，没有专门针对呼吸窗这种结构的现成计算模型，因此在这 5 种模型中进行选择时，带有一定的主观因素，本论文选择了“MoWiTT”模型，因为该模型适用于低层建筑的光滑的垂直表面，因此和节能呼吸窗的功能最为接近。

对于内表面对流换热系数的计算（见图 11 中 h_{blind} ， h_{cav} ， h_{in} ）本文选用了 TARP 算法，该种算法适用于多种由于温差引起的自然对流，与本文中模型的情况最接近。

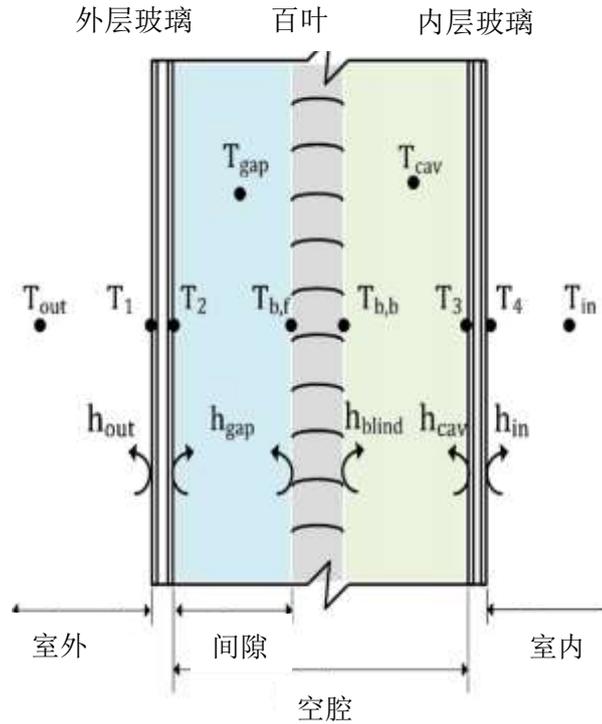


图 11 装有遮阳百叶的空腔横截面

3.2.3 透射太阳辐射的模型设置

根据 EnergyPlus7.2 版本的 Input-output reference, EnergyPlus 软件中共有五种方式描述太阳辐射的分布情况: Minimal shadowing, Full Exterior and Full Interior And Exterior, Full Exterior with Reflections, Full interior and Exterior With Reflections。对于 Full Interior And Exterior 这种情况, 软件会计算太阳辐射通过外窗透射进入的辐射量, 并考虑遮阳设施对其影响, 从而计算出太阳辐射落在 zone 的每一个表面的辐射量; 除此之外, Full Interior And Exterior 这种情况下, 软件还会计算出外窗内表面从 zone 内其他外窗得到的太阳辐射中, 有多少被吸收, 多少被反射到 zone 内。这些计算都会考虑外窗的遮阳设施的影响。在本文所讨论的模型中, 选择 Full Interior And Exterior 这种设置, 因为这样的设置最符合所建立的呼吸窗模型, 因为软件会考虑到在空腔内在玻璃以及遮阳百叶之间的多个表面多次反射的复杂情况。

3.2.4 空腔内的垂直气流

在节能呼吸窗中, 内层与外层玻璃之间的空间被称作空腔, 而遮阳百叶与玻璃之间的空间叫间隙。二者都受到遮阳百叶结构的影响, 如百叶的分隔, 百叶的

角度，百叶宽度，遮阳百叶与玻璃之间的距离等。换句话说，遮阳百叶的角度调到最大，即 90° 时，是最有利于间隙与空腔内的气流流动的，同时玻璃以及遮阳百叶表面的对流换热系数增大。不过，EnergyPlus 尚未能够考虑到百叶的结构与空腔内、间隙内气流组织的复杂关系。这将会给模拟的结果带来一定的误差。在此，本文认为有必要将夏季模型中遮阳百叶的结构情况做一定展示，见表 3。关于遮阳百叶的相关参数名称见图 12。

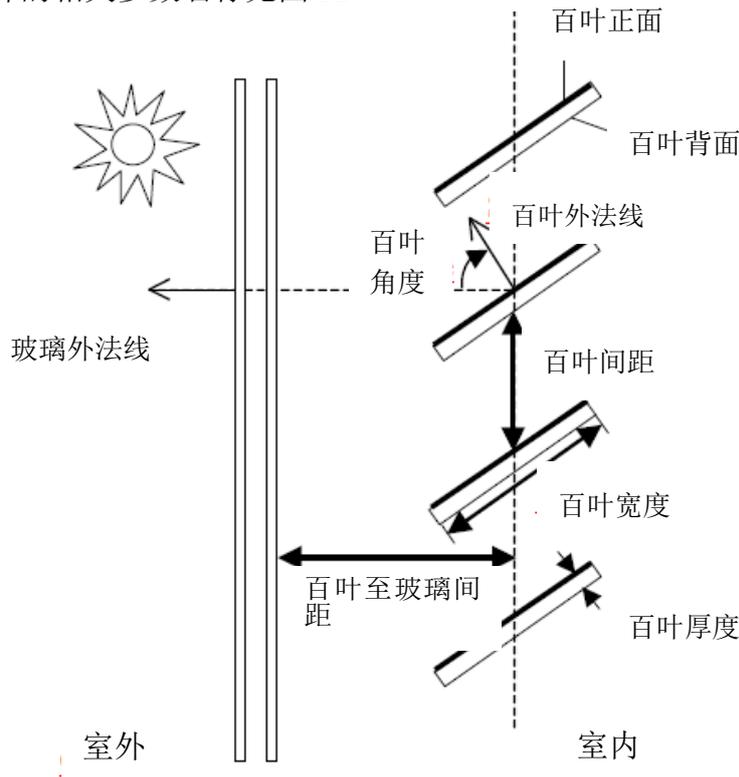


图 12 夏季模型遮阳百叶各项参数示意图

表 3 夏季模型遮阳百叶各项输入参数

材料	参数	输入参数值
遮阳百叶	宽度 width	0.025m
	厚度 thickness	0.001m
	百叶间隔 separation	0.018m
	角度（水平）Angle	45°
	前/后板反射率 Front/back Reflectance	0.8
	前/后板发射率 Front/back Emissivity	0.8
外层玻璃 (单层 8mm 钢化白玻)	太阳辐射入射率 Solar Transmittance	0.9
	前/后表面反射率 Front/back Reflectance	0.075/0.075

续表 3 夏季模型遮阳百叶各项输入参数

	前/后表面发射率 Front/back Emissivity	0.84/0.84
内层玻璃 (中空玻璃 6+9A+6)	太阳辐射入射率 Solar Transmittance	0.82
	前/后表面反射率 Front/back Reflectance	0.09/0.1
	前/后表面发射率 Front/back Emissivity	0.84/0.2

3.2.5 STS 夏季模型的建立

本文用 EnergyPlus 进行建筑能耗模拟, 但为直观的表达该窗户, 用 Sketch-up 作出冬夏季模型的建筑图。夏季模型如图 13。由于该房间模拟的是一栋办公建筑的某一房间, 因此考虑到实际情况下, 该房间除了南向的外墙其实都是实际建筑中的内墙, 与毗邻的房间并无热交换, 因此在 EnergyPlus 建模时将除了南向之外的外墙都设置为绝热 (“adiabatic”), 而南向外墙设置为面向室外 (“outdoor”)。本文用 EnergyPlus 建模, 对模型中可变的各参数进行优化, 以达到最大的节能效果。夏季模型中可变的参数有内层玻璃顶部缝隙的高度, 空腔底部缝隙 OA 宽度 (如图 13 所示), 以及上悬倾角 α 。由于在 EnergyPlus 中改变这些尺寸非常繁琐, 所有的几何尺寸变化均采用手动输入, 因此本模型中并未对这些可变参量作连续变化进行模拟, 而是间断地选取值, 而模拟结果也发现, 这些变量的选取足够得出一些结论。空腔底部缝隙宽度选 0.02m, 0.03m, 0.04m, 0.05m, 0.06m, 0.07m, 0.08m, 0.1m, 0.15m, 0.2m; 而上悬角度 α 选取了 2° , 5° , 7° , 10° , 13° , 15° , 20° 这几个角度进行模拟, 由于受到结构强度的限制, 因此上悬角度最大 20° , 因此不再进行 20° 以上的角度建模。关于内层玻璃顶部缝隙的高度这个几何尺寸, 在下文中我们不再将其进行优化, 因为模拟结果显示, 打开该缝隙会使得冷负荷骤增, 因此第四章的夏季呼吸窗模型的模拟结果均为关闭该缝隙的结果, 详见第四章。

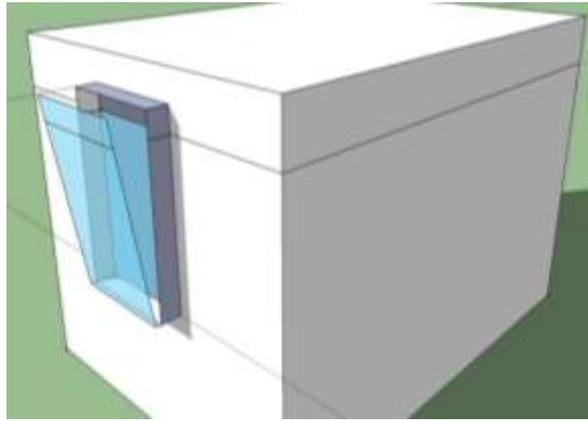


图 13 STS 夏季模型图

夏季模型的气流组织如图 14, 四个分区(zone)分别对应下图四个节点(node), 空腔内的空气受到热压作用上升从而形成气流, 从 4 区流向 3 区, 再从 3 区流向室外, 室外空气从外窗底部 OA 补入空腔, 这部分空气还会受到室外风压的作用; 另一方面, 室内空气同样在热压作用下上升, 从 1 区流向 2 区, 再从 2 区流向 3 区, 上述的气流情况是夏季大部分工况下会出现的情况, 不排除有少数时间段会有气流因为风压等环境参数的影响而变化。

EnergyPlus 中的 Air Flow Network 模块, 对于缝隙、缺口等的模拟有两种方法: (1)“缺口”(crack)方法; (2)“有效渗漏区域”方法(Effective Leakage Area); 对于空腔底部缝隙 OA 以及 3 区顶部的开孔, 均采用 Air Flow Network 模块中的“缺口”(crack)方法进行模拟, 使用这种模拟方法需要输入的参数有空气质量流量系数 ($\text{Kg}/(\text{s}\cdot\text{m}\cdot\text{pa}^n)$)、温度修正系数、气流指数; 本模型中, 空气质量流量系数均选为 1, 气流指数均选为 0.65, 温度修正系数的参考温度和气压为 20°C 及一个标准大气压 P^0 。对于 1 区和 2 区之间以及 3、4 区之间假想的分隔孔洞, 由于是水平孔洞, 因此它的模拟方法采用 Air Flow Network 模块中的“水平开口”(horizontal opening) 进行模拟, 其输入参数有空气质量流量系数 (取 1), 以及流量系数, 由于这两种孔洞的面积较大, 因此流量系数取 0.8。

对于夏季模型, 2 区和 3 区之间以及 1 区和 4 区之间的空气渗透, 则采用 Air Flow Network 模块中的“有效渗漏区域”方法(Effective Leakage Area) 进行模拟。而对于冬季模型, 由于 2 区和 3 区之间的缝隙处于打开状态, 因此这时采用另一种形式“Detailed opening”来描述气流, 这种描述方式针对竖直方向的孔隙。

Air Flow Network 模块中, “Effective Leakage Area”用来模拟表面的空气渗透, 其描述的压力与气流的关系是:

$$\dot{m} = ELA * C_d \sqrt{2\rho} * (\Delta Pr)^{0.5-n} (\Delta P)^n \quad (33)$$

式中：

\dot{m} =气流质量流量 (Kg/s)

ELA=有效渗透面积 (m^2)

ρ =空气密度 (kg/m^3)

ΔPr =参考压差 (Pa)

C_d =流量系数

n =质量流量指数

使用 Effective Leakage Area 模型进行模拟时，需要输入的参数有流量系数、气流指数以及有效渗透面积 (m^2)。本模型中，考虑到夏季模型 2 区和 3 区之间的缝隙以及 1 区和 4 区之间的缝隙较小，因此取较小的流量系数，取 0.05。有效渗透面积参考 ASHARE HANDBOOK——通风与渗透。墙体、天花板、门窗部分的渗透面积分别为 35%、18%和 15%^[42]。

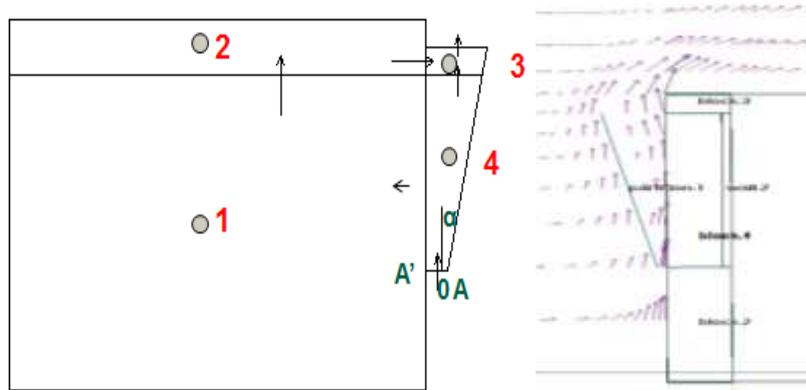


图 14 夏季模型节点分布及气流组织

3.2.6 冬季模型的建立

冬季模型开启方式为下悬，其可变参数为下悬角度 α ，以及内窗顶部的开口高度 Inner crack。和夏季模型一样，冬季的模型也只选取了几个代表性的变化参数的值进行模拟。下悬角度 α 为 2° ， 5° ， 9° ， 10° ， 13° ， 16° ， 20° ；而内窗顶部的开口高度选 0.01m，0.02m，0.05m，0.1m，0.2m。在冬季，空腔内空气收到热压作用上升，从 4 流向 3，再从 3 流向 2，此处完成了将室外空气经过空腔加热送入室内的作用，同时也向室内补充了一定的新鲜空气，达到了通风的效果。

对于冬季模型，1、2 区之间的水平孔洞，3、4 区之间的水平孔洞，1、4 区

之间的空气渗透以及空腔底部的缺口的气流模拟方法同夏季模型，所不同的是，2、3 区之间的气流不再通过缝隙渗透，而是有一个更大的孔洞，方便加热过的室外空气进入室内，因此此时 2、3 区之间的气流模拟用“细节孔洞”（detailed opening），此方法适用于较大的垂直孔洞的气流组织模拟，在此处比较适合。Air Flow Network 模块中，“Detailed Opening”用来模拟通过门窗的气流，又被称为“大的垂直开口”。这样的开口中的气流组织受到热压作用以及风压作用，例如外窗中在顶部气流从室内流向室外，而底部从室外流向室内，因此形成双向流。在 EnergyPlus 中，这样的开口默认不受到遮阳设备的影响，从而在计算通过窗户的传热以及太阳得热时，也不会受到开口气流的影响。

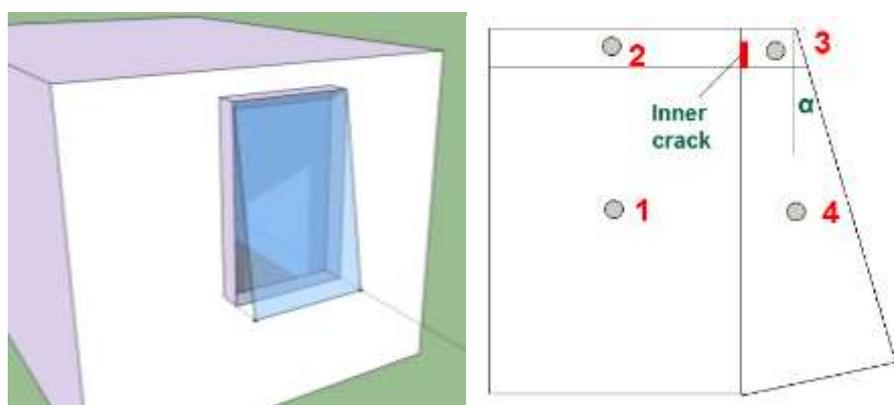


图 15 冬季模型

第四章 模拟结果的分析

4.1 气流组织结果

用 EnergyPlus 中的 Air Flow Network 模块进行气流模拟的结果如表 4~表 7。表 4 和表 5 的结果对应的模型是夏季模型，模型参数是上悬角度为 10° ，空腔底部缝隙宽度为 0.1m。气流模拟结果表明，在夏季和冬季，模型的气流流向大致符合之前的理论分析，根据龙惟定^[9]等人对双层皮幕墙这种结构的理论分析，空腔内的气流速度在 0.1m/s-0.3m/s 之间，从模拟结果可以看出，4 区到 3 区的流速属于空腔内流速，比较接近此流速范围，而其余流速也在正常自然对流的气流速度范围内。这里值得一提的是，2、3 区之间气流流量很小，是由于缝隙很小所致。（夏季模型内窗顶部的缝隙关闭，空腔循环模式为外循环），这可以从另一个角度证明用 EnergyPlus 的 Airflow Network 模块是比较合理的。

表 4 夏季晴天气流结果（7 月 15 日 13:00）

流向	2→3	3→室外	1→2	4→3	室外→4
流量(m ³ /s)	0.0001	0.112	0.218	0.213	0.113
流速(m/s)	0.0055	0.178	0.0162	0.519	1.43

表 5 夏季阴天气流结果（7 月 9 日 13:00）

流向	2→3	3→室外	1→2	4→3	室外→4
流量(m ³ /s)	0.0009	0.153	0.154	0.152	0.152
流速(m/s)	0.0047	0.240	0.011	0.414	1.902

冬季模型对应的模型参数为下悬角度 10° ，内窗顶部缝隙高度为 0.03m，模拟结果见表 6、表 7。

表 6 冬季阴天气流结果（1 月 10 日 13:00）

流向	3→2	4→1	1→2	4→3	室外→4
流量(m ³ /s)	0.0154	0.0131	0.328	0.0154	0.0154
流速(m/s)	0.256	0.03	0.02	0.073	0.0306

表 7 冬季晴天气流结果（1 月 15 日 13:00）

流向	3→2	4→1	1→2	4→3	室外→4
流量(m ³ /s)	0.0443	0.00547	0.359	0.0442	0.0442
流速(m/s)	0.738	0.013	0.025	0.211	0.0883

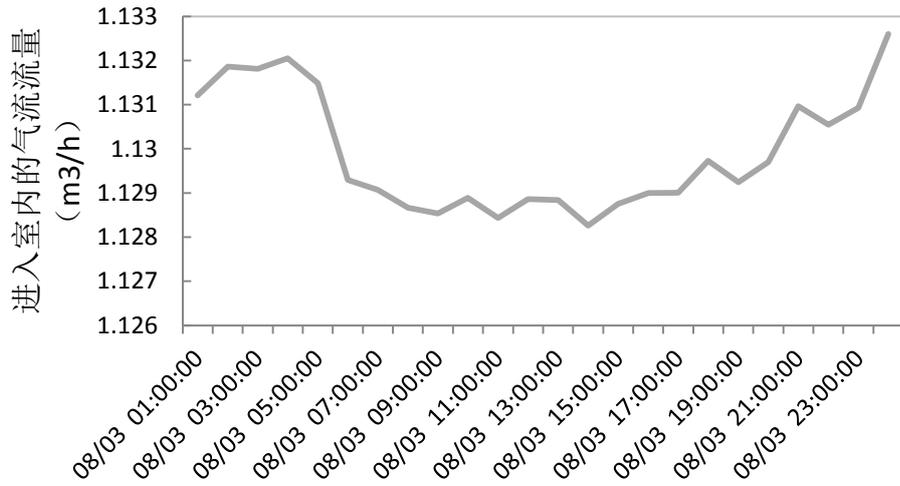


图 16 夏季模型某一天中通过呼吸窗空腔的空气流量 (m³/h)

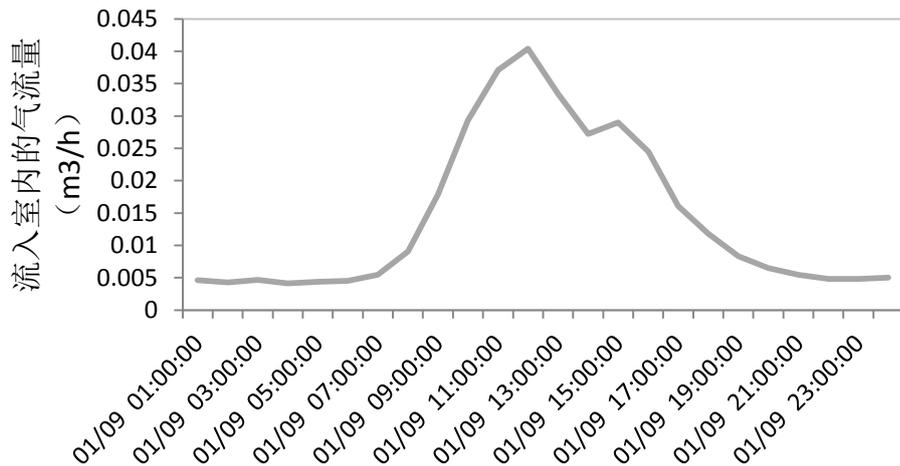


图 17 冬季模型某一天中通过呼吸窗流入室内的空气量 (m³/h)

另外，从图 16 以及图 17 可以看出。夏季，呼吸窗模型一天中空腔的气流流量在一天中的中午达到最大值，在凌晨以及夜晚的气流量均较低；而在冬季，呼吸窗模型一天中经空腔流入室内的空气量在中午左右的时候达到最低，而在凌晨及夜晚比较高。这是因为在夏季，对于处在夏热冬冷地区的上海，室外的空气温度是非常高的，而空腔内的温度虽然比室外高，但是室外的空气也处于由于高温而处于上浮的状态，因此在太阳辐射较大，室外温度较高的中午时刻，很难形成空腔内由下而上的一股气流，因此空腔内的空气流量也比较小；而对于夏季的凌晨和夜晚，由于室外没有了太阳辐射，因此气温逐渐降低，在这样的情况下，空腔内的温度相对较高，从而增强了空腔内的热压作用，进而增大了空气流量。在

冬季，也是相同的道理，而且在冬季，由于室外温度更低，室内外的温差以及空腔与室外空气的温差都很大，由此形成的热压作用就比较强烈，这也就解释了冬季经过空腔的空气流量要大于夏天。至于为什么冬天的中午比夜晚的空气流量大，这是因为冬季的白天，空腔内由于玻璃材质，因此在太阳辐射的条件下温升更大，因此相较于夜晚能够与室外的空气形成更大的温差。

4.2 温度模拟结果

由于此 STS 模型的原理与双层皮幕墙相近，都是一种被动式太阳能的节能手段，室外环境的太阳辐射对节能效果影响较大，因此将模拟结果与气象参数中的太阳直射辐射强度进行联系分析，以探究呼吸窗的效果与太阳辐射强度的关系。图中 STS 模型为外层玻璃上悬角度为 7° 时，空腔底部缝隙宽 0.07m 的几何尺寸下的模拟室温。图 18 为制冷季 STS 模型与传统模型的室温对比，图 19 挑出具体的一天对比呼吸窗模型与传统模型的温度变化对比。

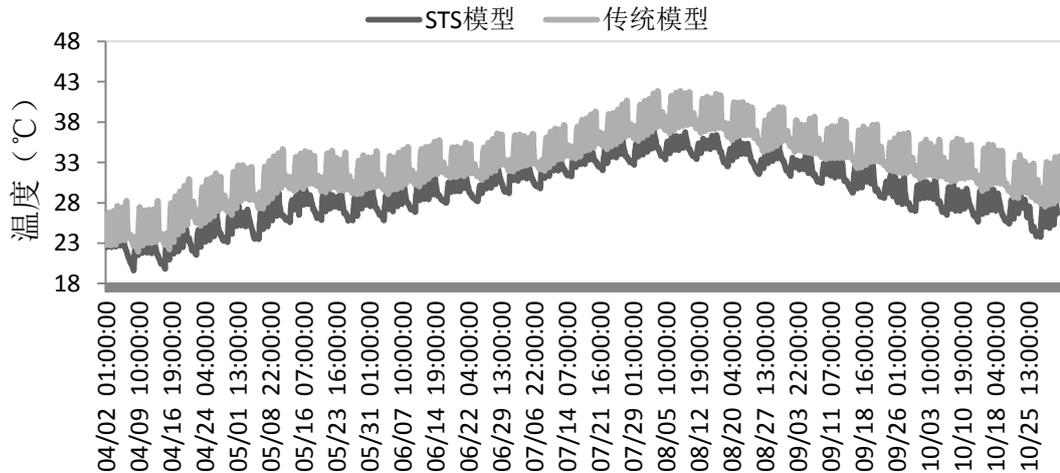


图 18 制冷季 STS 模型与传统模型的室温对比

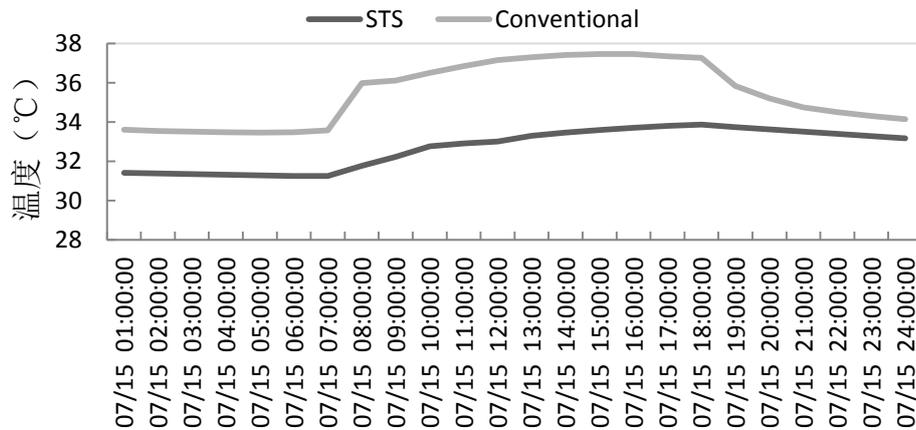


图 19 夏季传统模型与 STS 模型的室温对比

(7月15日, 24.9°C-31.6°C)

从上图可以看出,在制冷季内,在不开空调的情况下,呼吸窗模型的室温均在传统模型以下。图 20 更加直观地显示出二者温差。由此可以看出,温差平均在 4.5°C 左右,在节能效果比较明显时可达 5~8°C。图 21 为制冷季的太阳直射辐射的变化曲线,太阳直射辐射强度来自上海典型气象年参数。比较图 20 和图 21,我们更加清晰地对比呼吸窗模型与传统模型之间在不开空调的自然状态下,二者温差与太阳直射辐射强度之间的关系。当太阳辐射强度比较大的时间段内(如 8 月 2 日附近),呼吸窗模型与传统模型的温差也较大,但这只是一个趋势,这说明在一般情况下,太阳辐射强度越大,即天气越晴朗,二者自然状态下的温差越大,或者说呼吸窗的优势越明显,这一趋势在大部分时间内适用,但仍有一些时间段内,晴天的温差反而低于阴天的,那是因为呼吸窗的效果除了受到太阳直射辐射强度的影响外,还受到室外环境的风压(风速、风向)的影响,因此使得上述趋势有时会发生偏差。

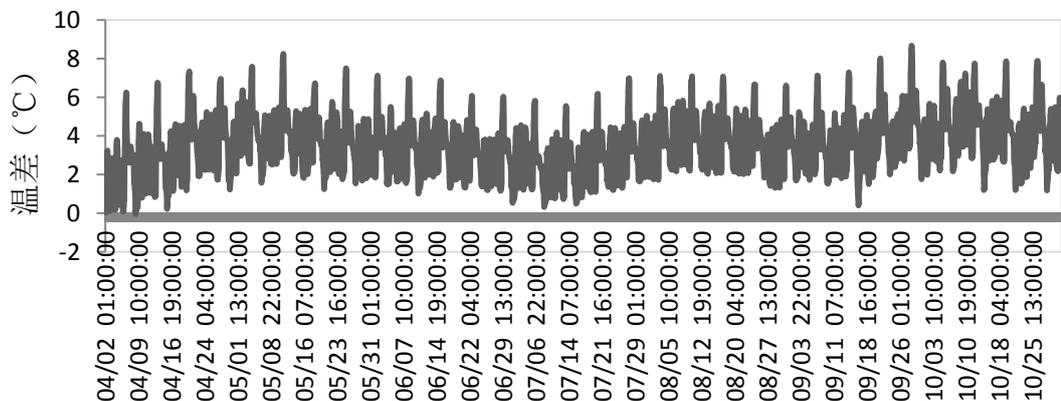


图 20 制冷季 STS 模型与传统模型的温差变化曲线

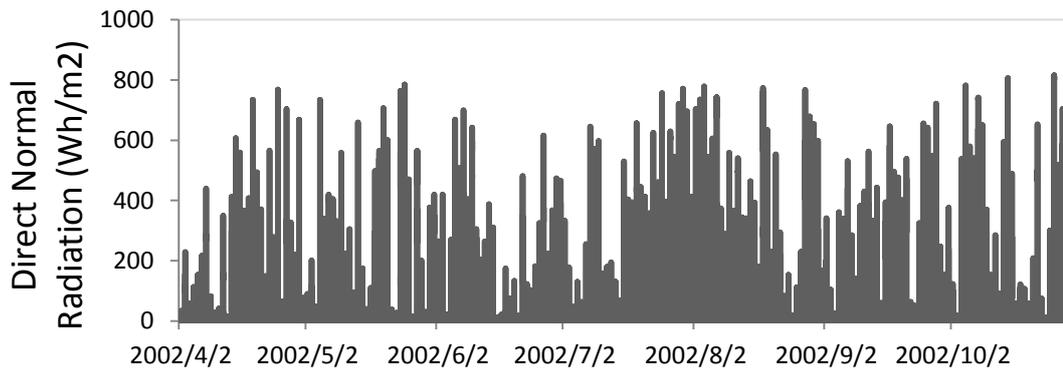


图 21 制冷季太阳直射辐射强度曲线

在模拟冬季模型时，气象参数仍为上海地区的气象参数。下面为将传统模型与呼吸窗模型的空调系统都关闭的情况下，对比二者的室内温度。本文选取了制热季中 3 天的模拟数据进行对比分析，分析发现，在典型气象年最冷的那天（即 1 月 31 日），STS 呼吸窗模型显示出了最大的节能潜力，尤其是在夜间，当室外温度低至零下时，STS 模型仍可保持 2.5°C 及以上的室温，比室外温度高出了 $3\text{-}4^{\circ}\text{C}$ ，但这一优势随着日出以及随之而来的太阳辐射的逐渐加强而渐渐减小，这是因为在白天和夜晚，STS 呼吸窗的节能性体现在不同的地方，白天，呼吸窗内加热空腔的因素有太阳辐射以及回收室内余热两方面，而太阳辐射加热空腔的作用和传统模型相比，并无太大的优势，因为传统模型只有一层玻璃，太阳辐射可以更小的损失进入室内成为一部分得热，因此从这一角度来说，对于 STS 呼吸窗来说，太阳辐射加热空腔这一优势就会微小很多，另外，由于在白天，在太阳辐射的加热下，室内外温差本身不是特别大，因此空腔的热回收作用也会显得很微弱。综上，在晴朗的白天，STS 呼吸窗的节能效果并不明显，甚至在室外温度较高，太阳辐射很大的天气内，STS 呼吸窗在白天中午左右的时间内，温度低于传统模型。

而在夜间，STS 呼吸窗的保温以及节能的作用就会很大。这是因为，在夜间，室外的温度很低，且没有太阳辐射，因此室内向室外的散热量是很大的，在这种情况下，呼吸窗的空腔就起到了很大的热回收的作用，使得室内由外窗散出来的热量得以有效回收，而传统的模型是没有这一重要的结构的，因此在不开空调时，室内温度很低，而且仅有的热量也会大量不断地传向室外。另外，从图 22-25 可以看出，当室外气温越低的天数里，呼吸窗的保温效果也越好。这一点在 4.4 节中将会有进一步的探讨。

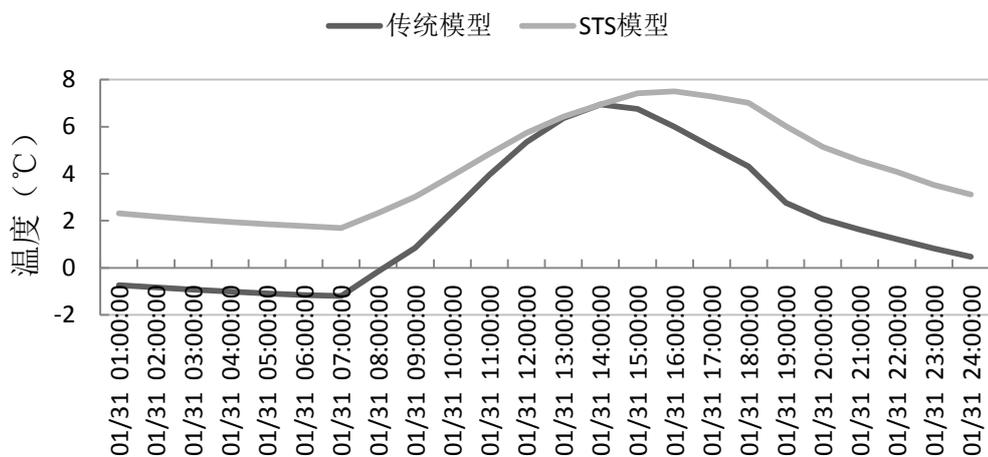


图 22 冬季 STS 模型与传统模型的温度对比

(1月31日, -7~-2°C)

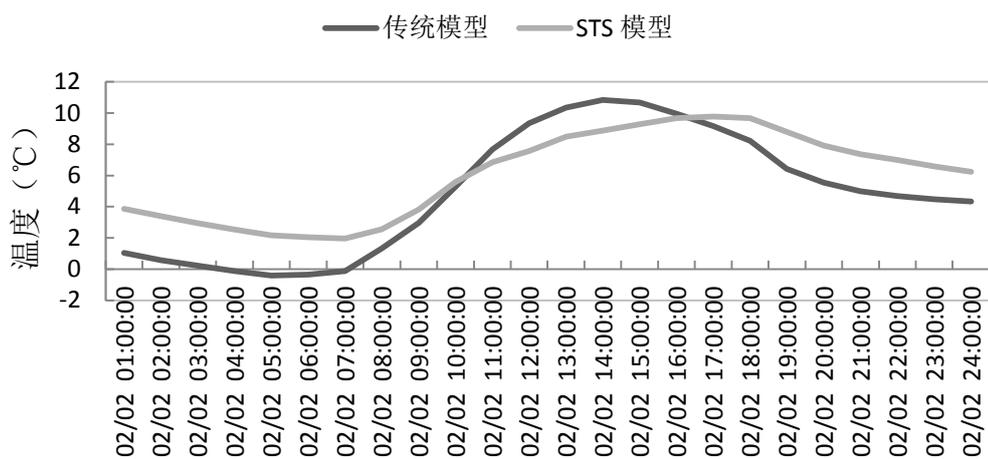


图 23 冬季 STS 模型与传统模型的温度对比

(2月2日, -5.7~3.7°C)

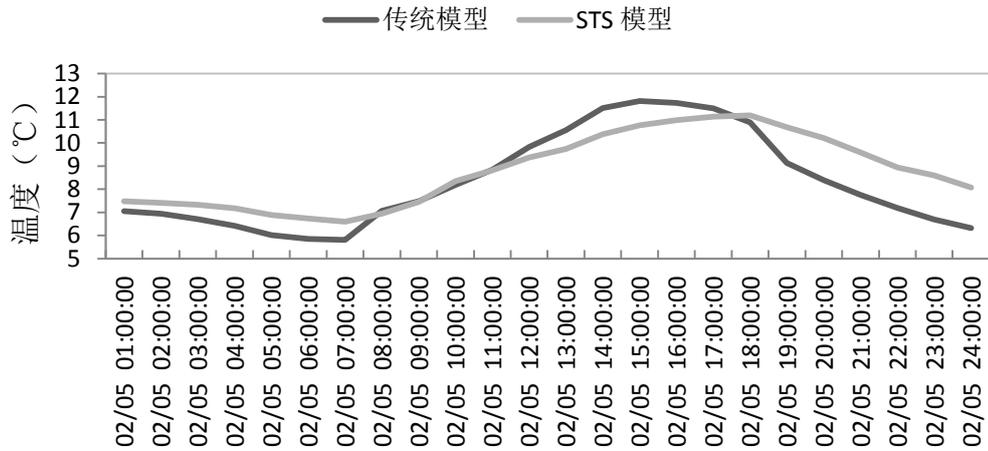


图 24 冬季 STS 模型与传统模型的温度对比
(2月5日, 3~7°C)

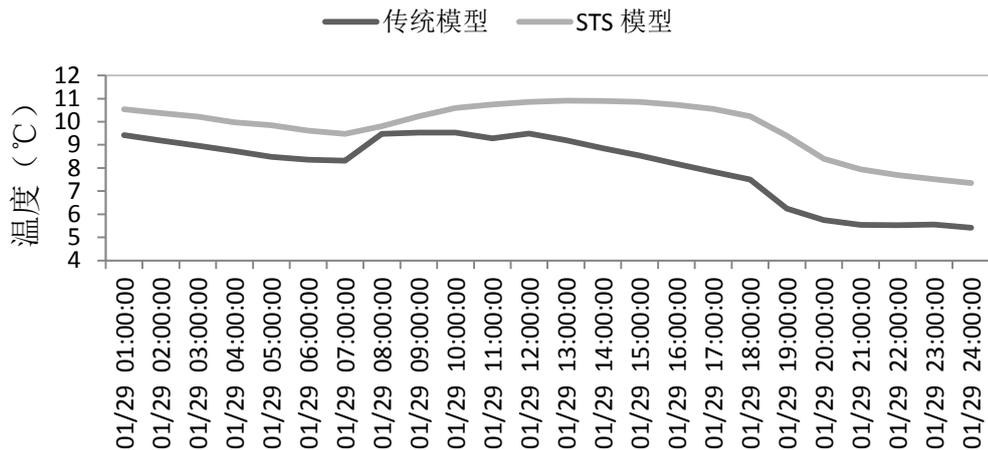


图 25 冬季 STS 模型与传统模型的温度对比
(1月29日, 0.3~6°C, 平均温度 2.48°C)

4.3 冷热负荷模拟结果

4.3.1 夏季模型负荷结果

下面分析夏季呼吸窗模型的各项几何尺寸对建筑冷负荷的影响。首先，本文研究了内层玻璃顶部缝隙高度的影响。图 26 对比了打开内缝以及关闭内缝对呼吸窗模型的冷负荷的影响。可以清楚地看出，打开内缝时，在过渡季（4 月~6 月以及 10 月）内，会降低冷负荷，而在高峰时间段（6 月~9 月），打开内缝会使

冷负荷急剧增加,因此本文建议对于夏季呼吸窗模型,在过渡季节打开内层缝隙,是一个很好的节能措施,在过渡季内,大约能降低冷负荷 202KW。

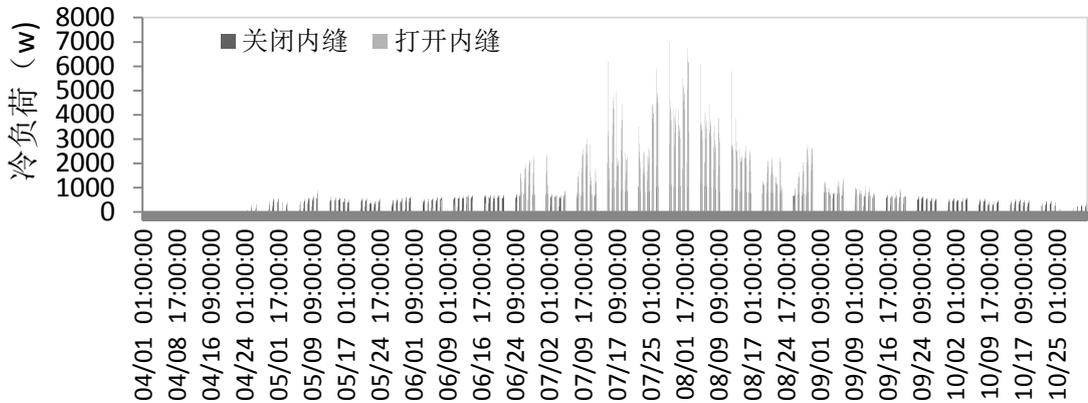


图 26 内缝对冷负荷的影响

其次,对 STS 夏季模型的空腔底部缝隙宽度进行优化,发现不同的缝隙宽度对电耗的影响如图 27。当缝隙宽度为 0.07m,模型的冷负荷最低。究其原因,底部缝隙的宽度影响到气流从底部流入空腔的初始状态,当底部缝隙的宽度非常小时,这将对室外的空气通过底部缝隙流入空腔造成一定的难度,从而使呼吸窗的效果打折,而当底部缝隙的宽度过大时,则容易在底部入口处形成横向气流,从而无法使气流有规律地并且有效地形成竖向气流,同时带走遮阳百叶以及空腔内的积聚的热量,综上,底部缝隙的宽度一定会在其中某一个点打到最佳,既不会阻碍室外空气流入,又不会形成无效的气流。

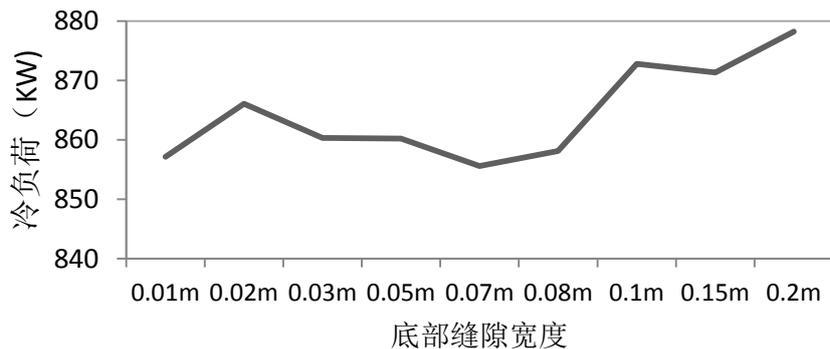


图 27 不同空腔底部缝隙宽度对夏季模型耗电量对比 (上海)

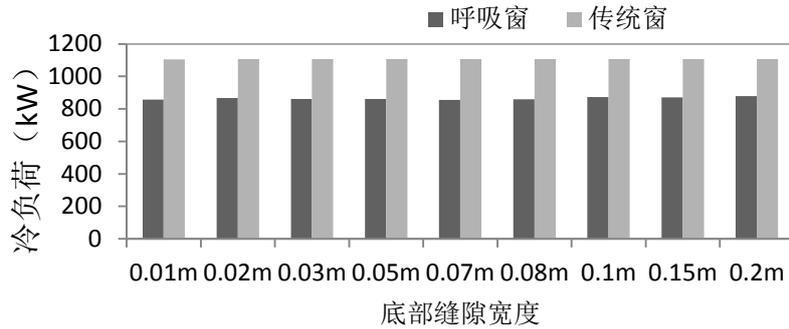


图 28 不同空腔底部缝隙宽度的夏季模型与传统模型耗电量对比（上海）

夏季模型的另一个重要的结构参数是上悬角度，若该角度过小，则影响夏季空腔内的通风情况，可能导致遮阳百叶上的热量未能及时带走引起过热；若该角度过大，则会导致空腔内气流不受限制，形成乱流。从模拟结果来看，不同上悬角度对电耗的影响不同，当该角度为 7° 时，电耗最低。

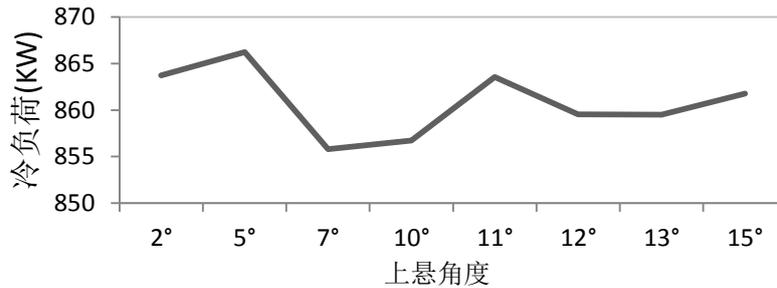


图 29 不同上悬角度对夏季模型耗电量对比（上海）

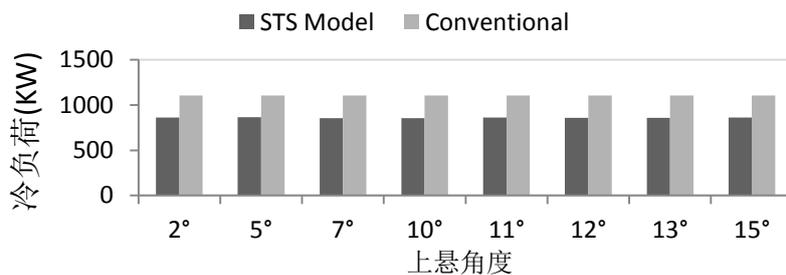


图 30 不同上悬角度的夏季模型与传统模型的耗电量对比（上海）

从图 30 可以看出，在制冷季内，相较于传统模型，STS 模型均能达到 20% 以上的节能率。但是进一步分析模拟数据，我们还会得出更多的结论。其实，STS 呼吸窗在冷负荷高峰月份的表现并不好，虽然在制冷季内的节能率能达到 20% 以上，很大程度上都是 STS 模型在过渡季所降低的冷负荷起到了很大的作用。

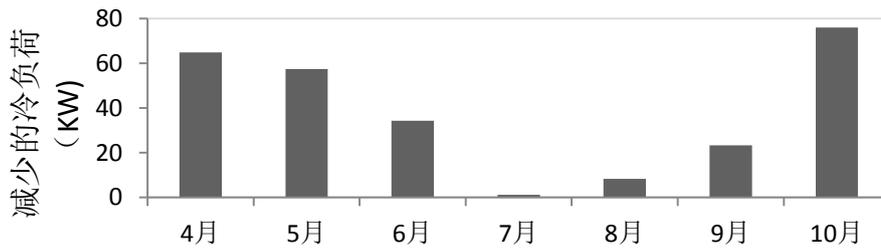


图 31 制冷季呼吸窗模型相较于传统模型减少的冷负荷

如图 31，STS 呼吸窗的模型在过渡季节 4、5、6、10 月的节能效果较好，特别是 4 月和 10 月，STS 呼吸窗表现出了很好的节能潜力；而在冷负荷的高峰月份 6、7、8 月的效果显得没有那么好，特别是 7 月份，几乎没有显示出任何的节能效果。究其原因，如第二章所述，STS 呼吸窗模型的节能效果主要受两股因素的影响，其一是太阳辐射强度，其二就是风压。在冷负荷高峰月份，上海地区的太阳辐射强度非常高，在晴天最高能达到 $600-800\text{KW}/\text{m}^2$ ，这样强大的太阳辐射作用在空腔内，可想而知此时空腔内所积聚的太阳辐射得热是非常高的，而这部分热量主要靠空腔内的热压以及室外风作用在窗户上的风压作用下的气流流动带走遮阳百叶表面的热量。由于本模型完全是自然作用，并未有机械通风，因此 STS 模型的效果在很大程度上受到室外环境的影响。在室外风速较大，且风向有利的天气下，STS 模型可以发挥最大的作用，降低空腔内的温度从而达到节能的目的，但若室外条件不利，即室外无风或风向不利于空腔内气流流动时，STS 模型的效果也会大打折扣，例如在 7 月，此时室外的太阳辐射强度造成的冷负荷已经远远大于自然通风可以带走的热量，因此 STS 模型的作用就显得很微弱了，在 4.4 小节探讨气候的适应性中会对这一想法作进一步解释。

4.3.2 冬季模型负荷结果

对传统模型以及冬季模型的热负荷进行模拟，选取冬季较温暖的一天（12 月 26 日）以及较寒冷的一天（1 月 31 日）的逐时冷负荷进行对比，如图 32-33。比较 12 月 26 日以及 1 月 31 日这两天的热负荷的结果，可以清楚的得出这样的结论：首先，在一天中，正午 13:00 左右的时间段内，呼吸窗模型并不比传统窗节能，而在早晨和夜晚太阳辐射强度不是很大的时间段内，呼吸窗模型反而显示出很大的节能作用。其次，较温暖的这一天（12 月 26 日）的总体节能量要小于较寒冷的一天（1 月 31 日）的节能量，计算可知，12 月 26 日节省的热负荷为 2.04KW ，而 1 月 31 日这天减少的热负荷为 5.66KW ，是 12 月 26 日的两倍多。

对于这样的模拟结果，本文认为，首先是因为在白天和夜晚，STS 呼吸窗的

节能性体现在不同的地方，白天，呼吸窗内加热空腔的因素有太阳辐射以及回收室内余热两方面，而太阳辐射加热空腔的作用和传统模型相比，并无太大的优势，因为传统模型只有一层玻璃，太阳辐射可以更小的损失进入室内成为一部分得热，因此从这一角度来说，对于 STS 呼吸窗来说，太阳辐射加热空腔这一作用就会微小很多，另外，由于在白天，在太阳辐射的加热下，室内的温度本就不是很低，室外的温度也不是很低，因此空腔的热回收作用也会显得很微弱。综上，在晴朗的白天，STS 呼吸窗的节能效果并不明显，甚至在室外温度较高，太阳辐射很大的天气内，STS 呼吸窗在白天中午左右的时间内，温度低于传统模型。而在夜间，STS 呼吸窗的保温以及节能的作用就会很大。这是因为，在夜间，室外的温度很低，且没有太阳辐射，因此室内向室外的散热量是很大的，在这种情况下，呼吸窗的空腔就起到了很大的热回收的作用，使得室内由外窗散出来的热量得以有效回收，而传统的模型是没有这一重要的结构的。

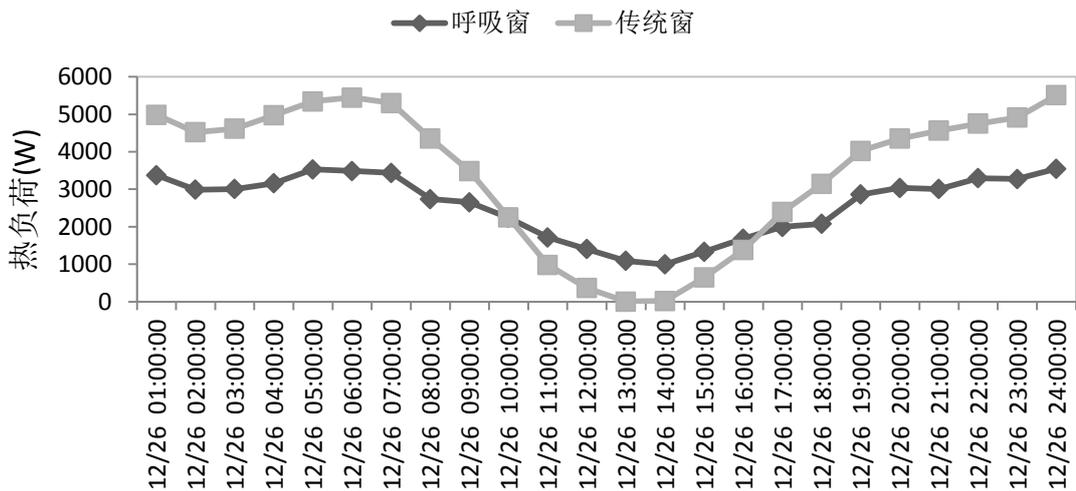


图 32 冬季逐时热负荷对比 (12月26日, 平均温度 1.04°C)

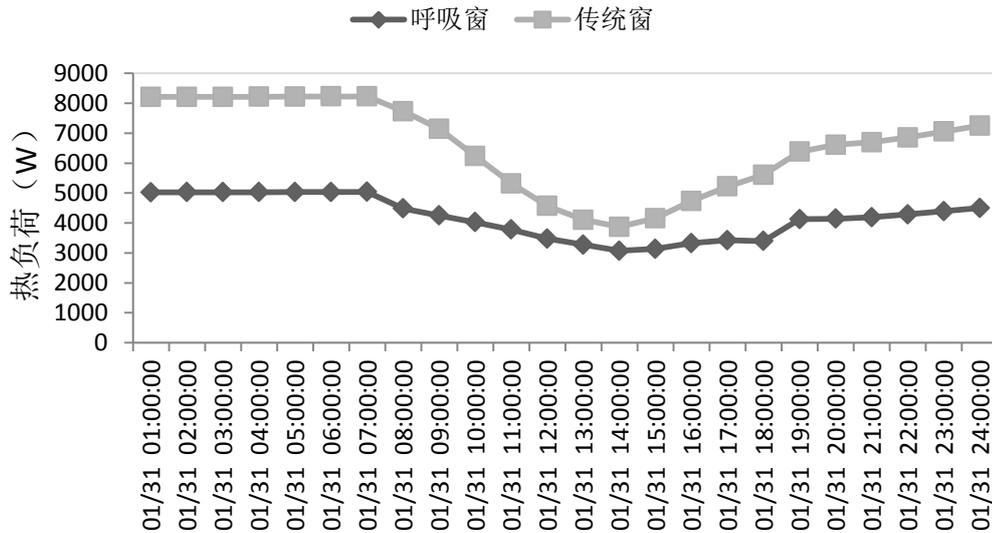


图 33 冬季逐时热负荷对比 (1月31日, 平均温度-4.89℃)

其次, 该呼吸窗模型在冬季的节能性体现在对室外冷风侵入引起的热负荷的减小, 因此理论上讲, 室外温度越低, 此种呼吸窗的节能性越高。因此, 对于冬季气候比上海地区更加严寒的地区来说, 该种呼吸窗理论上应该会有更好的表现。为验证这一结论, 本文还对同样的模型在北欧的芬兰这一严寒气候地区下进行了计算, 结果如图 34-35 所示, 可以看出, 在冬季及其严寒的芬兰地区, 呼吸窗模型的节能潜力远远大于上海地区。对于位于北欧的严寒地区的芬兰, 同样可以得出相似的结论, 在最寒冷的 1 月 12 日, 呼吸窗模型显示出了非常好的节能作用, 一天所减小的热负荷高达 10.35KW, 而在较温暖的 2 月 22 日, 呼吸窗的作用就会减弱一些, 特别是在下午 14:00 左右, 呼吸窗甚至没有节能作用。这一结论还会在下文对欧洲的寒冷地区的模拟结果中可以得到进一步的验证和阐述。

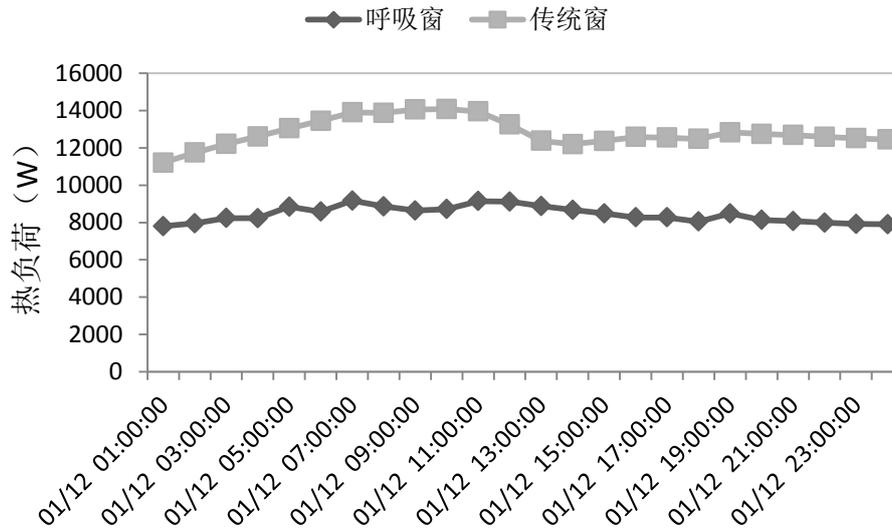


图 34 冬季逐时热负荷对比（1月12日芬兰，平均气温-16.48℃）

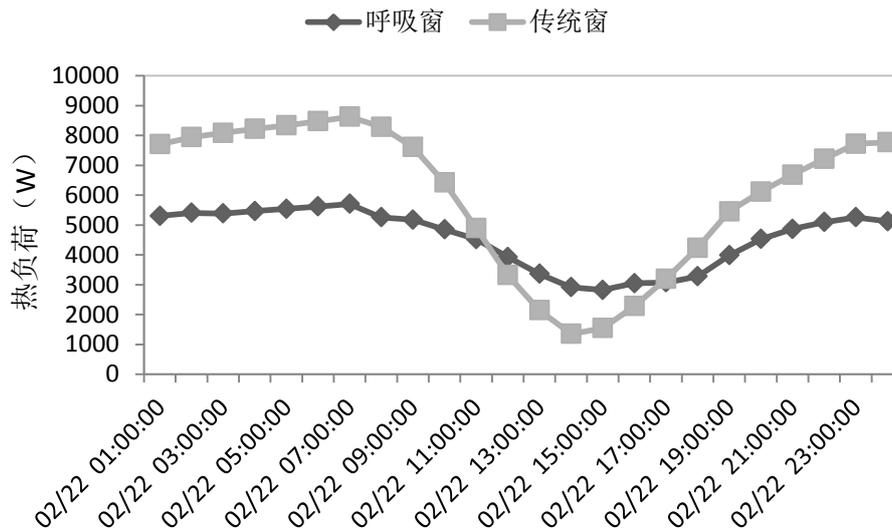


图 35 冬季逐时热负荷对比（2月22日芬兰，平均气温-4.67℃）

对不同的下悬角度的冬季模型进行对比模拟，发现不同程度的节能效果，节能率在 25.3%~44.46%之间。从图 36 的模拟结果可以看出，当角度由 2° 逐渐增加到 20° 时，STS 呼吸窗模型的耗热量逐渐增加，尤其是在较小范围的角度内增加更加明显，耗热量最小的是 2° 的角度，最大的是 20°。这个结果是在意料之中的，有之前的呼吸窗原理以及传热模型的分析中，我们可以知道对于冬季模型，其节能性体现在与传统模型的冷风侵入引起的热负荷上，在保证室内空气品质的基础上，新风量应是越小越好的，因为空腔内的温度固然高于室外，但毕竟还是低于室内温度的，因此经过空腔预热进入的空气越多，自然会引起更高的新

风负荷，从而增加了热负荷。因此，对于 STS 呼吸窗的冬季模型，自然是下悬角度越小越好的，但是又不能角度过于小。

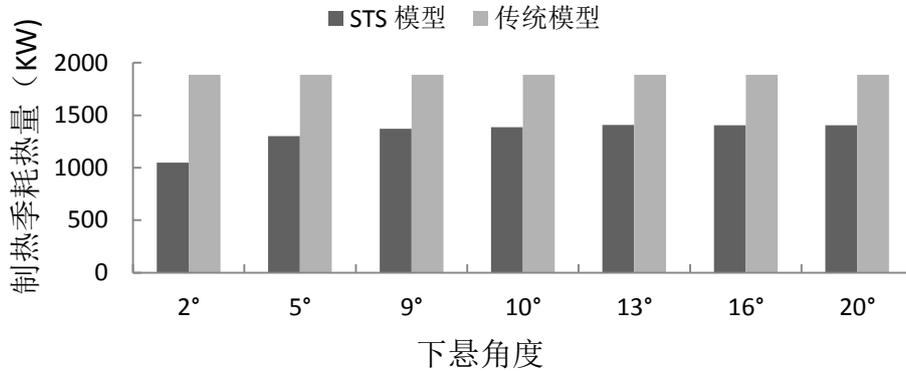


图 36 不同下悬角度的冬季模型与传统模型的耗电量对比

图 37~38 为不同内层窗顶部缝隙高度（简称内缝高度）的 STS 模型对建筑在制热季（11 月~3 月）的能耗的影响，从图中可以看出，当内缝高度为 0.01 米时，STS 模型的能耗最低，而随着内缝高度的增加，能耗几乎呈指数上升。这是因为呼吸窗的高度不够，因此空气在进入室内前经空腔加热的的时间不够久，因此可能进入室内时的室外空气温度仍低于室内，因此带来热负荷的增加。

综上，对于冬季模式，建筑能耗随着上悬角度以及内部缝隙的高度的增加而增大。若单从节能意义上来讲，上悬角度越小，内部缝隙关闭是最节能的，但这违背了我们进行建筑节能的初衷，建筑节能不能以牺牲人体的热舒适为代价的。因此我们还需要满足最小新风的要求，如 ASHRAE 规定的办公建筑室内新风标准，即 10L/s 每人^[42]，即对于模拟所述的这样一个建筑来说，新风量要不小于 0.02m³/s，根据本研究的模拟分析，当上悬角度为 10°，内缝高度为 0.03m 时，热区 2 与热区 3 之间的气流速度在正午左右的时间为 0.3m/s，因此可算得这样的设定下，为室内提供的新风量为 0.018m³/s，可以满足 AHRAE 对于最小新风量的规定。而对于冬季模式，一天中正午左右的时间通风量达到最大值（见图 17），因此在其他时间，实际通风量是达不到最小新风量的，要求住户自己适当的加大内部缝隙或是增大上悬角度，这样对于住户来说又显得太过繁琐，因此本文建议一个能够在最不利的情形下能够满足室内空气品质的同时能够节能的尺寸，即内部缝隙 0.05m，上悬角度为 10°，这样虽然在白天正午的时候能够超过最小新风的标准，但能够在一天当中都能够使室内满足新风量的要求。

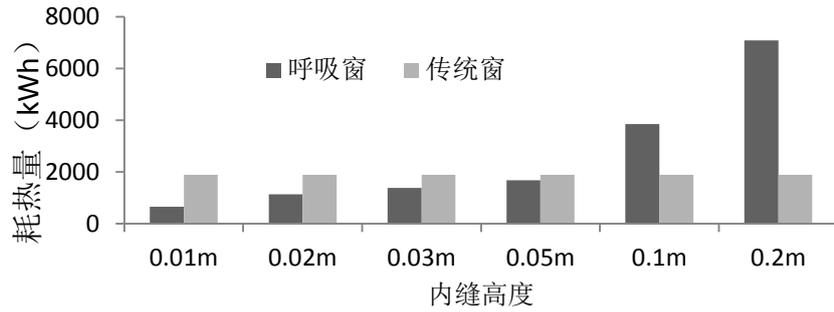


图 37 不同内缝高度的冬季模型与传统模型的耗电量对比

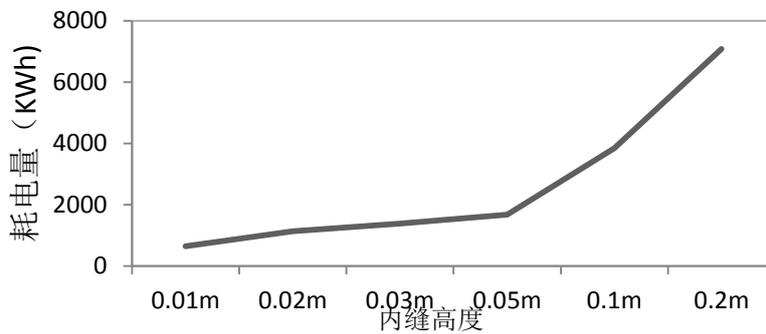


图 38 不同内缝高度的冬季模型耗电量

4.4 探讨 STS 模型对气候的适应性

从上述的模拟结果可以看出，虽然呼吸窗对建筑的冷热负荷及能耗有一定的降低作用，但呼吸窗的尺寸（包括夏季模型的上悬角度、底部缝隙宽度以及冬季模型的下悬角度、内层窗户的缝隙高度）对建筑冷热负荷的影响并不是十分明显，并且呈现出极大的不规律性；另外，我们可以明显地看出，在上海地区，呼吸窗对冷负荷的降低较小，对热负荷的降低则非常明显。分析发现，上海属于夏热冬冷地区，夏季十分炎热，室外太阳辐射强度以及室外较高的气温使得建筑的冷负荷非常高，而其中太阳辐射得热是影响其冷负荷的主要因素，而 STS 模型主要依靠自然通风将空腔内遮阳百叶表面由于太阳辐射吸收的热量带走，而如果这部分热量太大的话，那么因为气流带走的热量就微乎其微了；而对于制热季，因为 STS 呼吸窗本身就相当于一个被动热回收装置，可以将得到的太阳辐射以及室内逃出的热量都可以有效回收，并且室外的冷空气可以经过空腔进行一定的预热功能，更加提高了其在冬季的节能性。

在此基础上，我们需要进一步探讨呼吸窗的节能潜力及其适用性问题，即呼吸窗在何种气候条件下可以具有较高的节能潜力。从上述结果发现，上海地区在

夏季使用 STS 呼吸窗并没有很大的节能作用，是因为夏季过于炎热，自然通风带走的热量就十分微弱，本文将继续探讨 STS 模型是否在夏季凉爽的地区就有不一样的结果。就此，我们将目光投向了欧洲地区。由于整个欧洲地区幅员辽阔，因此我们取其典型的几个气候城市，巴黎、芬兰、波兰、罗马、柏林这五个气候城市。同样用 EnergyPlus 模拟发现，果然在这几个城市的夏季使用 STS 模型都有惊人的节能效果。这也从反面验证了对 STS 模型在上海地区降低冷负荷方面有限的效果是因为上海地区的夏季太过炎热，而呼吸窗通过自然通风力量相对微弱，因此覆盖了 STS 呼吸窗由于自然通风作用带来的节能效果。

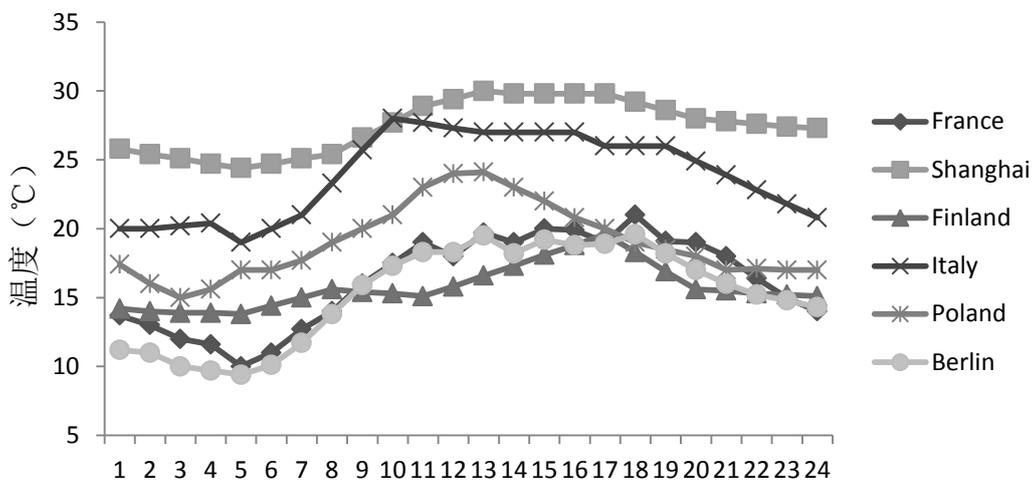


图 39 各地区设计日气温比较 (07/19)

从模拟结果可以看出（如图 40），STS 呼吸窗在芬兰、波兰、柏林、巴黎地区对降低冷负荷得到了惊人的效果。如图 39 所示，芬兰的夏季十分凉爽，且日较差很小，从各地区夏季设计日的气温比较也可以看出。芬兰国内大多数地区是海洋性气候，因此，与其他纬度相同地区相比，芬兰的气候，尤其是南部气候，会显得温和许多。六、七、八三个月是芬兰的夏天，温度一般在 25-30 摄氏度之间，夏季的平均温度达到 18℃左右。波兰地区同样也有着凉爽的夏天，波兰全境基本上属由海洋性向大陆性气候过渡的温带阔叶林气候。在通常情况下，波兰全年气候温和，冬无严寒，夏无酷热。最冷的 1 月份全国平均气温为-5~-1℃，最热的 7 月份全国平均气温为 17~19℃。而每年夏季全国平均气温约为 15℃，最热的地区即南部的西里西亚气温约为 19℃；冬季全国平均气温为-1℃~4.5℃。在如此凉爽的夏天，建筑本身的冷负荷就不高，此时自然通风可以带走的热量就占很大比重，在芬兰，制冷季的耗电量降低了 90%以上，如果应用得当，在制冷剂几乎可以不开空调。

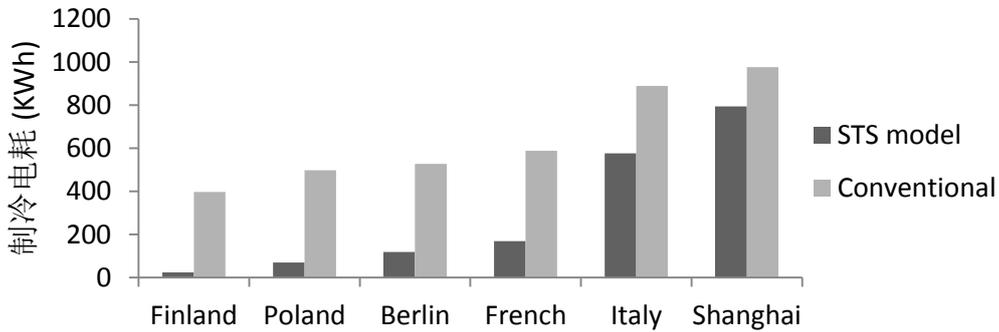


图 40 STS 呼吸窗在各地区制冷季节节能效果对比

值得注意的是，芬兰等欧洲地区夏季的冷负荷本身就比上海小很多，如果光从节能率上讲似乎不是很可观公平。我们还可以看一下各地区使用 STS 呼吸窗，其节省的电耗的绝对值。从表 8 和表 9 可以看出，对于夏季模型：芬兰等欧洲地区本身夏季的冷负荷很小，即使节能率很大的情况下，其节省的能耗绝对值也并不是很高，一个制冷季也只有几百度电，而对于冷负荷很高的上海地区，STS 呼吸窗的节能效果也并不理想。对于冬季模型的模拟结果（如表 9 以及图 41），不管是从节能率还是从节能的绝对值上来说，STS 呼吸窗在芬兰地区的节能潜力都异常惊人。节能率达到了 90% 以上，同时节能绝对值也有 4568KWh。冬季的节能效果最差的是意大利地区，因为热负荷很小，因此节省下来的能耗绝对值也较低。

表 8 STS 呼吸窗在制冷季的节能效果

	STS 能耗	Conventional 能耗	节省电耗绝对值
Finland	24.3	397.1	372.8
Poland	69.5	497.8	428.3
Berlin	119.2	526.8	407.6
French	169.1	588.6	419.5
Italy	576.1	888.9	312.8
Shanghai	794.4	976.4	182

表 9 STS 呼吸窗在制热季的节能效果

	STS 能耗	Conventional 能耗	节省电耗绝对值
Finland	2633.6	7201.8	4568.2
Poland	2017	5186	3169
Berlin	1663.8	4474.2	2810.4
French	1183.1	3450	2266.9

续表 9 STS 呼吸窗在制热季的节能效果

Italy	462	1163	701
Shanghai	766.8	2062.6	1295.8

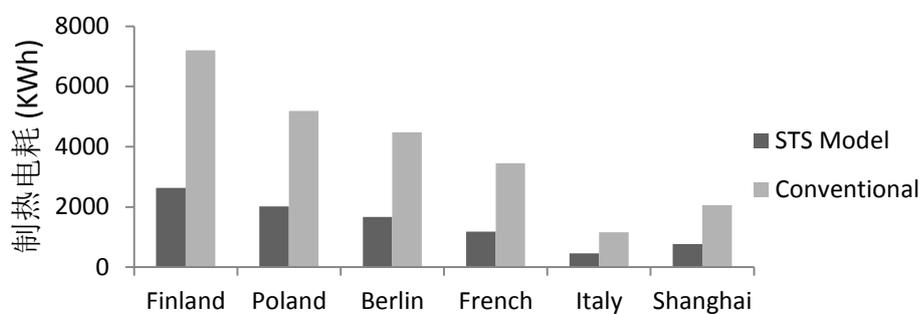


图 41 STS 呼吸窗在各地区制热季节节能效果对比

第五章 呼吸窗的节能性验证

5.1 实验平台简介

近年来,随着我国经济的高速发展,能源需求与供应之间的矛盾越来越凸显,节能成为热点问题。据统计,我国的建筑能耗占社会总能耗的 18%~20%左右,而且呈现上升的趋势,建筑节能越来越受到关注。而建筑节能工作的基础是对建筑能耗的准确把握、科学分析和合理预测。同时,近年来各种建筑节能技术的应用为减少建筑能耗做出了巨大贡献,而计算机能耗模拟方法是目前最常用的用来评价建筑节能技术效果的分析方法,世界上许多国家都开发出具有不同特点的建筑能耗模拟计算软件,比较有代表性的有 DOE22, EnergyPlus, TRNSYS, TRACE, DeST 等。然而,由于这些模拟软件在功能和复杂程度上都不尽相同,且如何校验其模拟结论是否能真实地反映建筑节能技术在建筑实际运行状态下的性能和表现是一个多年来都受到学界关注的焦点。其中一个重要的方法便是建立建筑能效测试平台,以验证和测试节能技术的实际节能效果。

该测试平台将结合国内外现有研究的经验和先进理念,并致力于弥补如今世界范围内缺乏能够全面地对综合性建筑节能技术实际应用效果做出评价和校验的不足,对 HVAC 系统节能技术、窗体和围护结构节能技术的测评进行有机的结合,使其成为国内外一流的建筑能效测试平台,为建筑节能技术的研发和应用提供有效的支持。

对于 HVAC 系统节能技术,该测试平台将 HVAC 系统的各个部件结合为一个有机的整体,而并非简单地测试单独暖通组件的能耗表现,因此该全能耗测试方法的亮点便在于着重评价整个暖通空调系统以及其个体组件之间的相互影响。建筑全能效测试平台能够将运行于真实环境条件下的建筑还原到全过程模拟实验中,实验室的环境温湿度控制系统可模拟不同的气候条件,从高温高湿度的热带气候,到低温低湿的亚寒带气候,平台的温湿度独立控制系统可帮助实现这一任务,以便研究在不同环境条件下暖通空调系统以及其设备的表现。该平台可用于测试和校验热泵系统,制冷系统,以及采暖设备中节能技术的实际运行表现,并可实现诸如以下控制条件下的实验测试效果:定风量、变风量控制、风机功率变频、低温气流分布、排风量控制等。

对于窗体围护结构节能技术,建筑全能效测试平台可通过其自身独有的设计和实验特点,测试实际状况下窗户周边随时间变化的热量得失。一般的窗体研发

部门都会对测试因时变能量流动而造成的窗体的整体或峰值能量需求投入大量精力。他们会通过一系列复杂的计算(如建筑能耗模拟)以获得计算结果。然而,在大多数情况下,可用作描述窗体的技术信息却是非常有限的,并会在现有的模型中给予不正确的表达,导致用户对于计算和模拟结果产生质疑。在这种情况下,在设定的室外条件下进行的维护结构的直接性能测试将为我们提供较高可信度的节能表现。该测试平台可以完成以下任务:提供不同窗体系统之间的直接实验对比、确定真实条件下的窗体传热系数以及太阳能得热系数、提供节能量计算的实证、测试及研究无法用计算方法获得的窗体节能表现。

5.2 实验描述

5.2.1 实验对象

在用 EnergyPlus 软件进行模拟分析的过程中采用了很多假设,因此呼吸窗的节能性仍需要通过实验测量的方法来验证模拟结果的准确性。本论文利用上述的同济大学全能效实验台中两个对比房间,来对比传统窗户的东侧房间与装有 STS 呼吸窗的西侧房间进行对比,对比主要从风机盘管的耗能以及在不打开空调系统的自然状况下两个房间室内温度两个角度进行。

为进行东、西两侧房间的能效对比,在开始实验之前,制作了一个 STS 呼吸窗,安装在西侧房间的南墙上。实际呼吸窗的结构如图 42-45。呼吸窗的外框的低端固定有 3 个导轨,外层玻璃可以自由地在沿着这 3 根导轨自由地滑动,从而调节外层玻璃与空腔之间的间距;如图 42,内外框之间有 4 个前后导轨,整个外框连着风琴布组成的“围护结构”也可以沿着这 3 跟导轨滑动,从而调节空腔的间距。夏季工况下,外窗的结构是下悬,因此,将外层玻璃及窗框沿着导轨调节,直到外窗与空墙之间的空气进口间距调节到实验所需的距离,外层窗由位于房间内的尼龙绳固定,也可以调节到 0° ~ 20° 之间的任意角度,夏季工况实验时,将关闭内层玻璃顶部的缝隙,内层玻璃及顶部缝隙的结构如图 45 所示。冬季工况时,外窗旋转方式变为上悬,内层玻璃顶部的缝隙会打开一个缝隙,实验中将整个窗户结构倒置,方便冬季工况调节上悬角度,另外,将外窗沿着顶部的 3 个导轨滑道最靠近空腔的一侧,从而保证冬季的呼吸窗结构,空腔内的气流通过内层玻璃的缝隙流入室内。

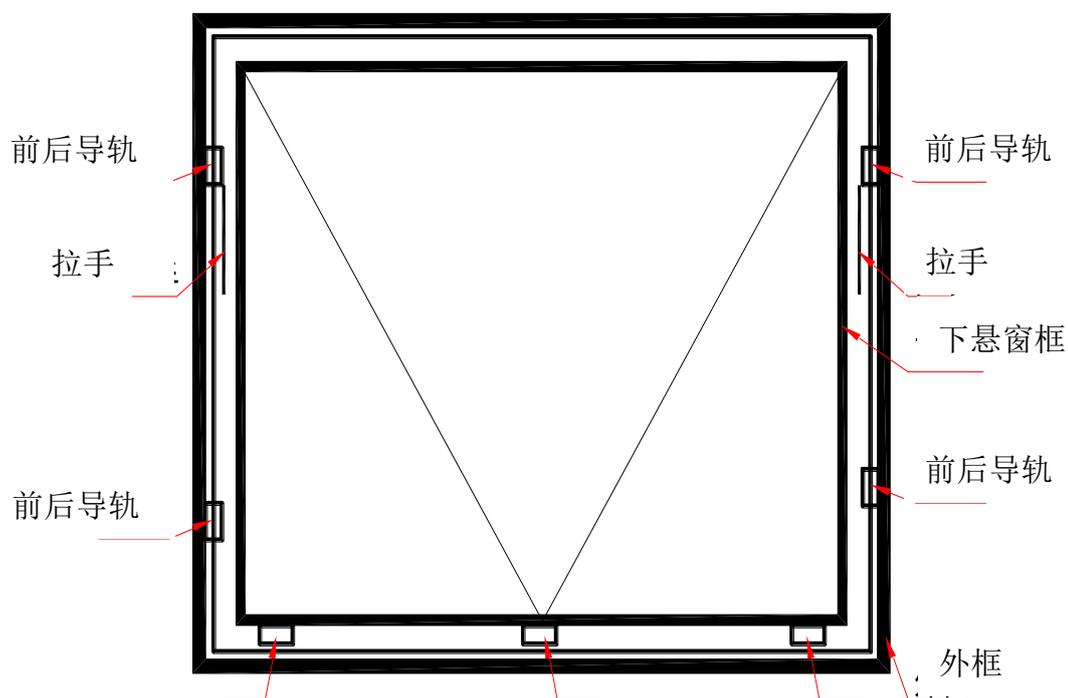


图 42 呼吸窗立面图

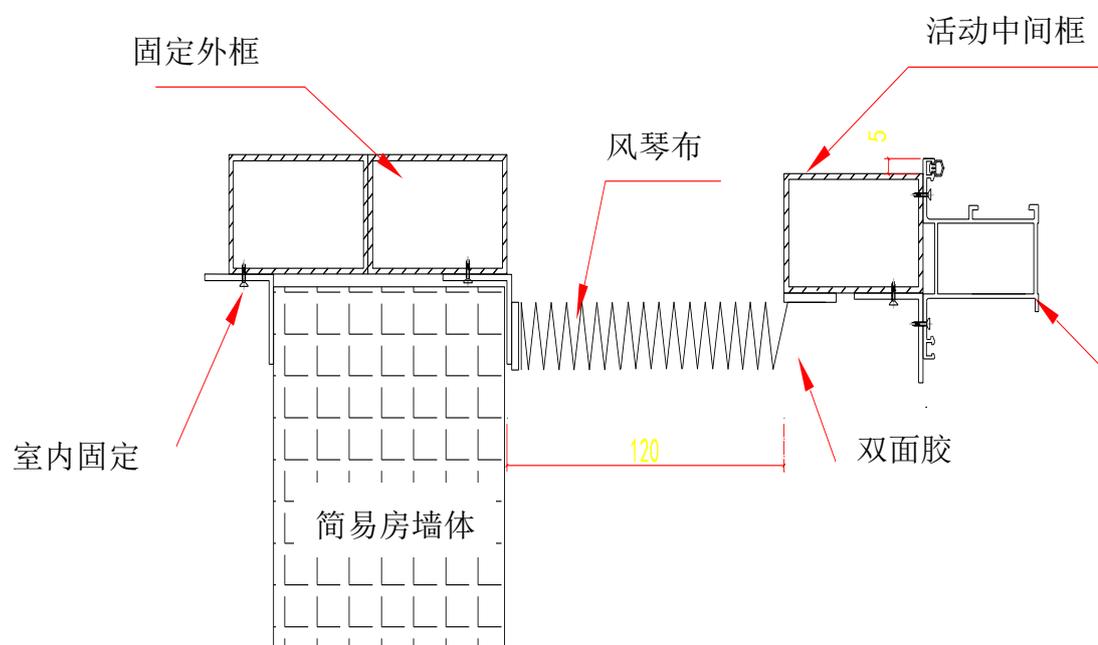


图 43 呼吸窗剖面图

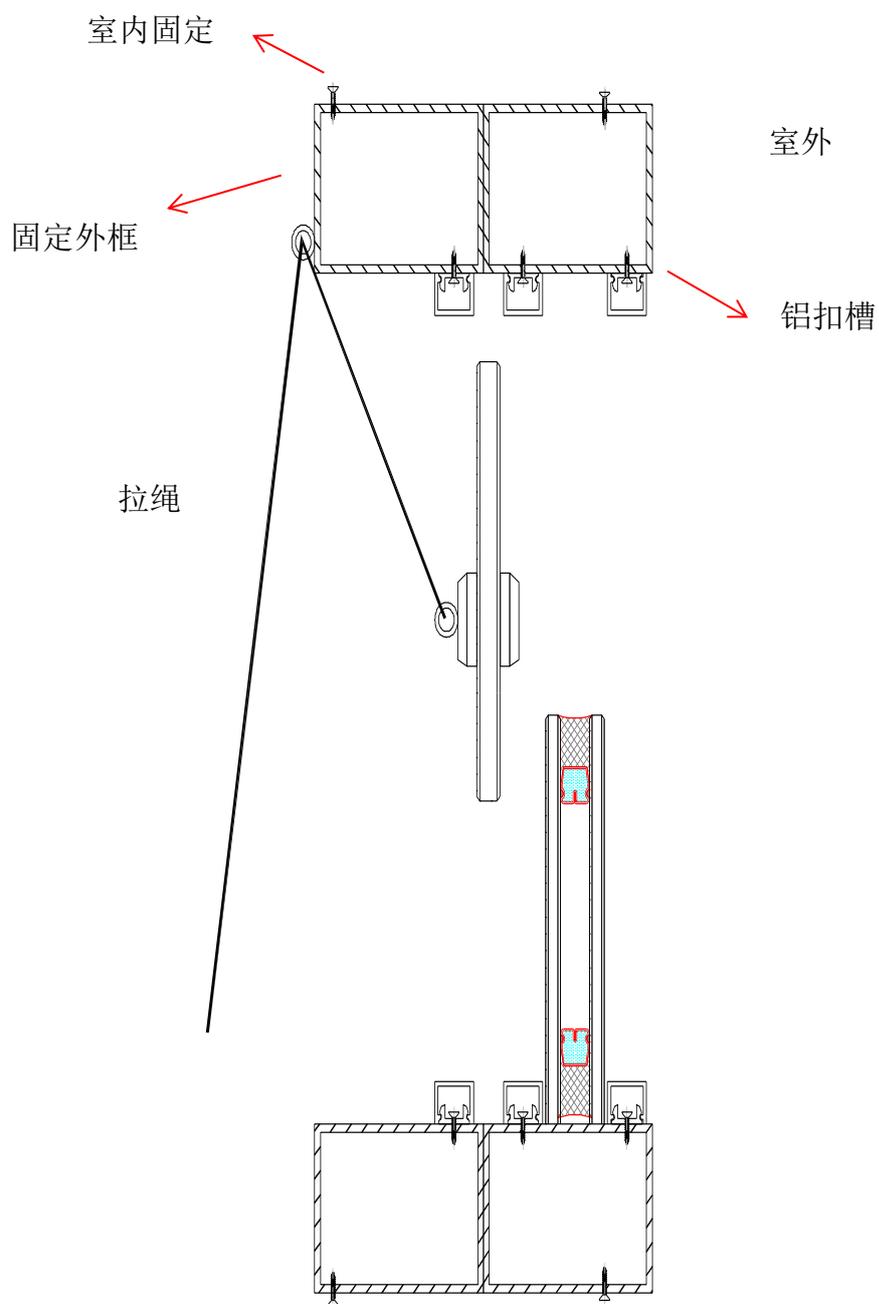


图 44 双层呼吸窗侧视图

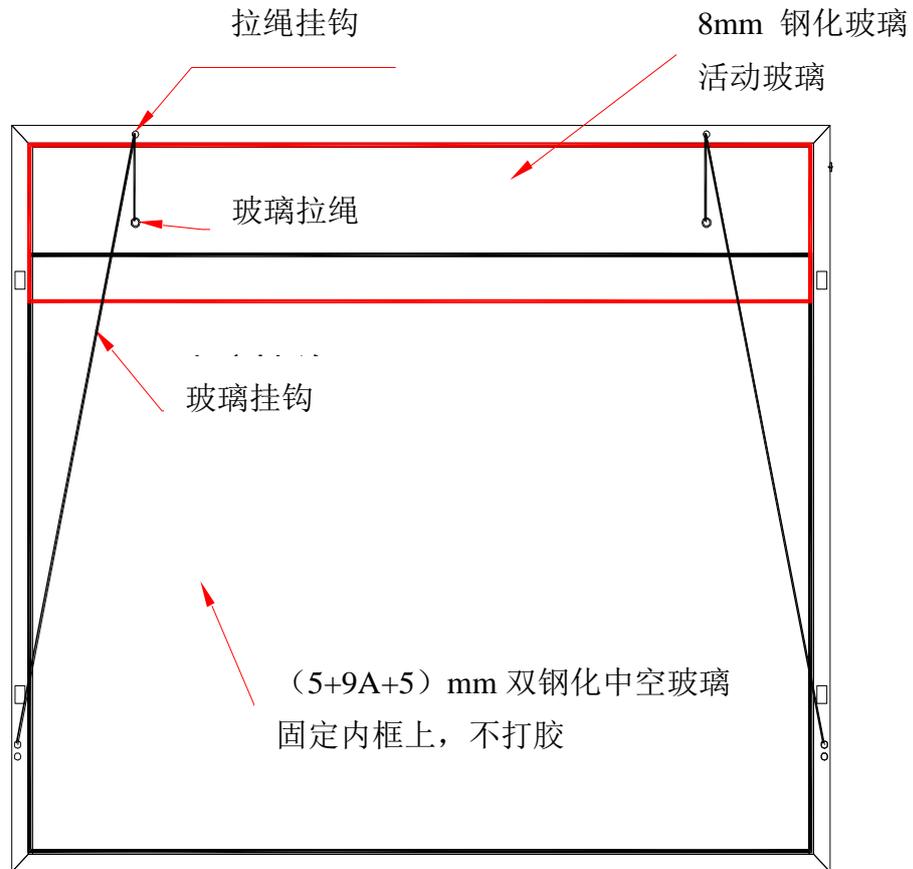


图 45 内层玻璃以及顶部缝隙结构

呼吸窗的原理如图 4, 影响 STS 系统空腔内部气流组织及传热性能的因素主要有两个: 烟囱效应以及外界环境 (风压系数、风速、风向等)。在夏季, 外窗开启方式为上悬, 底端固定, 但底端留有一定的空隙, 空腔内装有遮阳百叶, 空腔内的空气流动可以带走遮阳百叶吸收太阳辐射的热量, 避免了内遮阳向室内的传热, 也避免了外遮阳长期暴露在室外条件容易损坏的情况; 室内热空气受到热压作用上升到房间的顶部, 并从顶部开口流出室外; 在冬季, 窗户开启方式为下悬, 外窗顶端固定, 底部可以打开一定距离 (0-20cm), 与夏季模型不同的是, 外窗下悬时, 顶部不留空隙。空腔内的空气同样受到热压以及风压的作用, 沿着空腔上升, 这样, 室外冷空气经过空腔预热后顶部开口进入室内。这样, 避免了冬季直接受到室外冷空气的侵入, 又可以充分回收利用外窗向室外环境的散热, 从而达到节能与通风的目的。总体来说, 在冬季, 该种节能呼吸窗的节能性体现在原本直接侵入室内的室外冷风, 经由被加热的空腔后预热进入室内, 从而降低了冷风侵入引起的热负荷, 从而达到节能的目的。因此, 室内的冷风侵入引起的

热负荷越大，该种窗户的节能性应越大。

加工完成的呼吸窗外观如图 46-49。



图 46 STS 呼吸窗 1（夏季模型）



图 47 STS 呼吸窗 2（夏季模型）



图 48 STS 呼吸窗 1（冬季模型）



图 49 STS 呼吸窗（冬季模型）以及传统外窗

自然送风窗的窗型基础为目前上海地区常见的铝合金窗型，窗框材质使用现有的窗框材质，但不同材质的窗框在内部结构上差异较大，导致空气在窗框内流通形态不尽相同，空气通道的尺寸、阻力情况也千差万别，热压、风压的综合作用对不同的呼吸窗的作用不同，通风量也有所差异。

为更好地反映实验的效果，本文布置了若干测点。这些测点分别在呼吸窗的空腔内的 4 个温度测点，以及东、西室内的温度测点，以及东、西室风机盘管的进出水管上安装有温度测点及流量测点（均有冷热量计完成测量）。东、西室内的温度测点以及风机盘管的冷热量计均已在上一小节描述过，此处不再赘述，关于空腔温度测点的分布详见图 50。



图 50 呼吸窗空腔的温度测点（图中红色圈出）

5.2.2 实验方案

本实验通过对呼吸窗与传统窗的耗冷量/耗热量，关闭 HVAC 系统时室内的温度，空腔内各个断面的气流速度进行测量对比，从而达到通过实验数据验证模拟结果，并判断呼吸窗的节能性的目的。

5.2.3 实验内容

实验室总长以及总宽度分别为 8.5m 和 5m，两个实验台的外围护结构、地板、窗体结构、空调系统以及内部照明设施等皆为可拆卸组件，以满足进行不同节能产品测试的要求。图 51~54 分别为测试平台的俯视简图以及剖面简图。

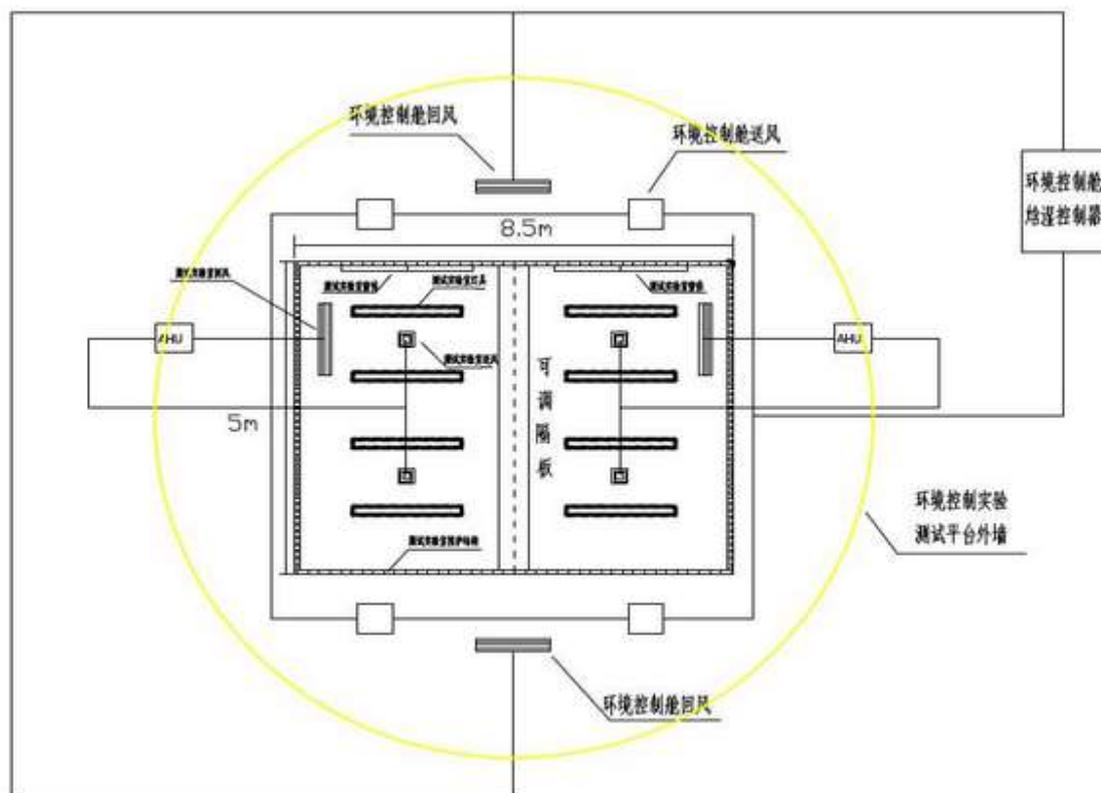


图 51 建筑全能效测试平台俯视图

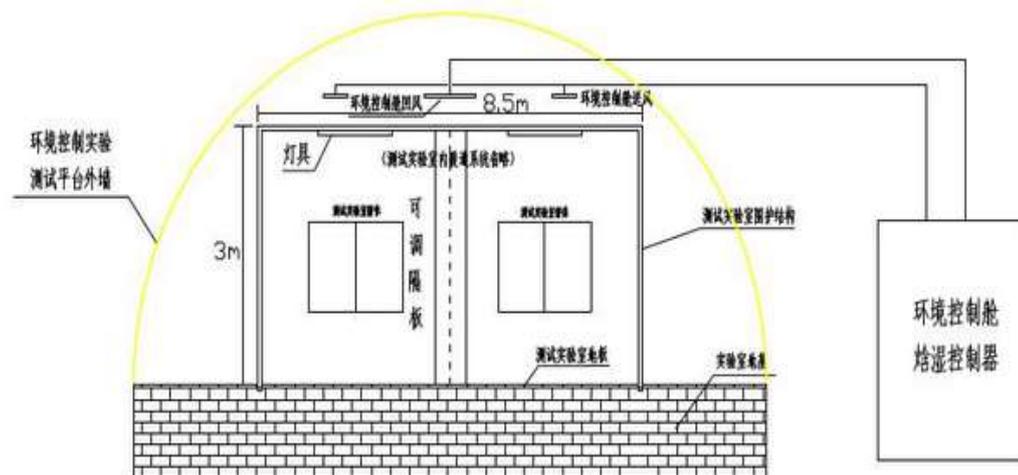


图 52 建筑全能效测试平台剖面图



图 53 建筑全能效测试平台实景（未合上遮阳板）



图 54 建筑全能效测试平台实景（合上遮阳板）

实验室外部为一玻璃顶罩，半径为 5m，整个将内部实验室包容在一密闭空间内。该玻璃顶罩可一年四季为实验室提供充足的自然光源，以实现窗体以及遮阳节能设计及产品的节能效果测试。该玻璃顶罩同时也将内部实验室与外部环境隔离开来，并能够通过制冷、采暖设备以及外部焓湿控制单元为内部实验室提供所需的人工气候条件，控制实验所需的温度以及湿度要求，以满足在不同气候条件下完成节能效果测试的要求。

玻璃球全能效实验台的空调系统分为两部分，一部分调控玻璃球内与东西房间之外的空间，这部分空间的温度通过对两台空气处理机组 AHU1 以及 AHU2 进行调节，东、西两个房间内的温湿度通过两台风机盘管 FCU1 以及 FCU2 进行调节。室外冷热源为空气源热泵，完成冬季制热、夏季制冷。空调设备列表见表 10。

全能效实验台内的采集装置包括(如图 55-59):东、西房间的温湿度传感器，用于测量东、西房间的壁温的温度传感器，位于屋顶的直射辐射仪，全辐射仪用来记录太阳直射辐射照度以及全辐射照度，这些采集器的数据全部会被传送到控制柜。采集的数据经过“同济大学玻璃球实验平台”软件的处理，并可以下载。

表 10 系统设备表

序号	名称	设备规格
1	空气源热泵	制冷量 30kW, 制热量 25kW
1	空气源热泵	制冷量 4kW, 制热量 4kW
2	风机盘管	冷量 1900w, 热量 3100w, 风量 340 立方米/时, 余压 30Pa
3	空气处理机组	冷量 15kW, 热量 16.3kW



图 55 全能效实验台室内空调设备



图 56 全能效实验台——室外主机



图 57 室内采集设备



图 58 直射辐射仪（左），全辐射仪



图 59 冷热量计以及三通阀（左），控制柜

5.3 实验结果分析

5.3.1 加热量结果

实验中分别测量了安装有呼吸窗与安装有传统窗户的房间的加热量，东室安装的是普通单层白玻，西室安装的是呼吸窗，实验为期一周，测得两室的加热量

如图 57-59。

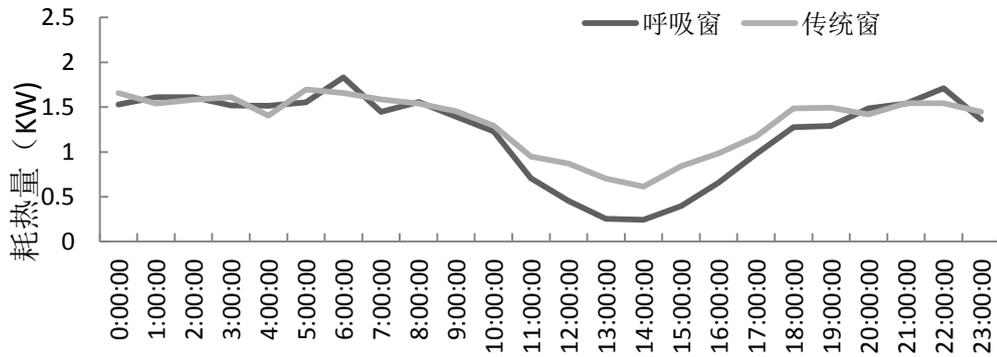


图 60 呼吸窗与传统窗房间的加热量对比 (1月 29日)

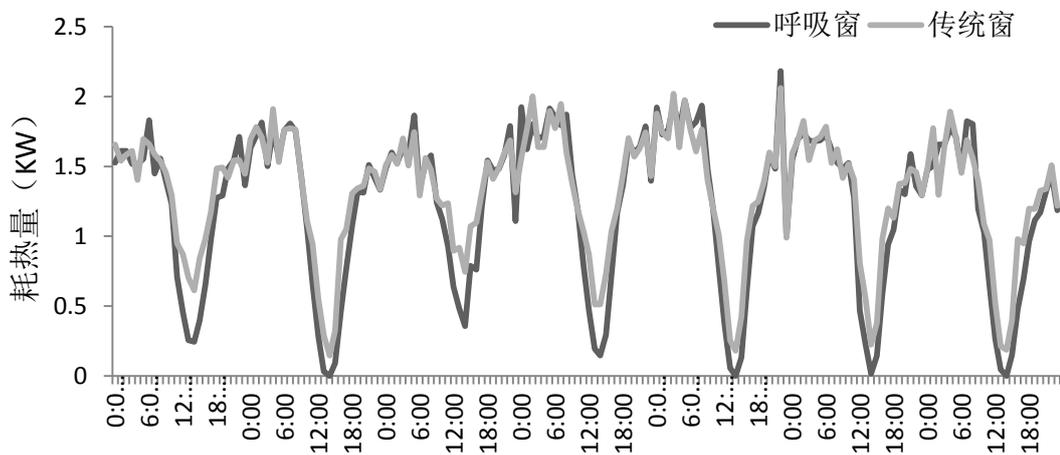


图 61 冬季一周的加热量数据 (12月 29日~1月 4日)

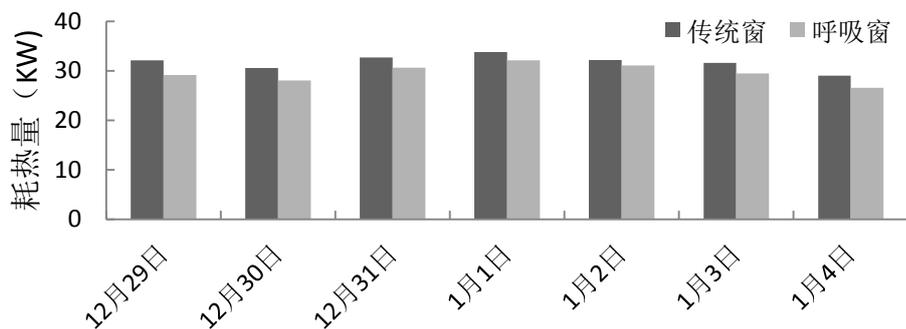


图 62 传统窗与呼吸窗的加热量对比 (12月 29日~1月 4日)

从安装有传统窗与呼吸窗的房间所消耗的加热量的对比(图 62)可以看出,呼吸窗的加热量均低于安装有传统窗户的房间,在实验的一周内,每天所减少的加热量大约在 1.1~2.4KW,每天的节能率约为 8~9%,虽然节能率并不是特别高,

但是考虑到实验时间所限，而实验这一周的天气均比较温暖，而正如前所述，冬季室外的气温越低，越有利于冬季模型发挥节能潜力，因此，笔者相信如果在深冬气候里进行测试，冬季模型会有更高的节能率。

5.3.2 温度结果

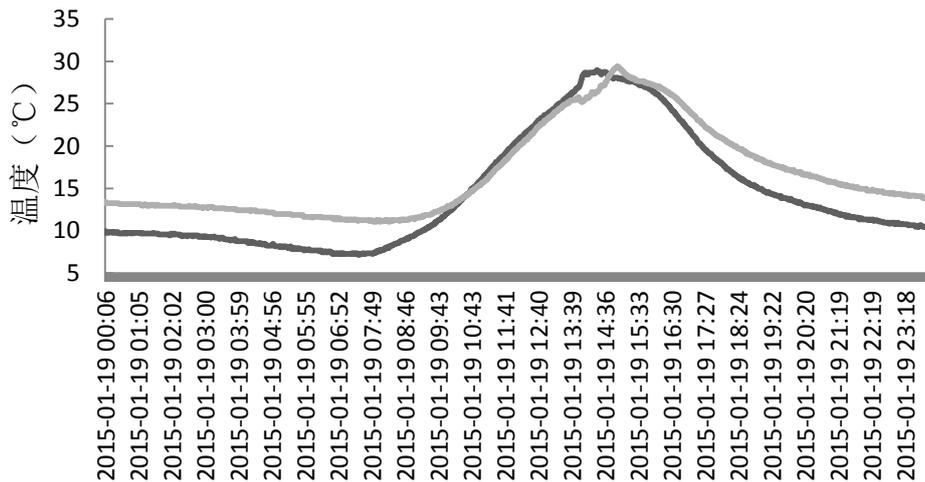


图 63 实测传统窗与呼吸窗室内温度对比（1月19日）

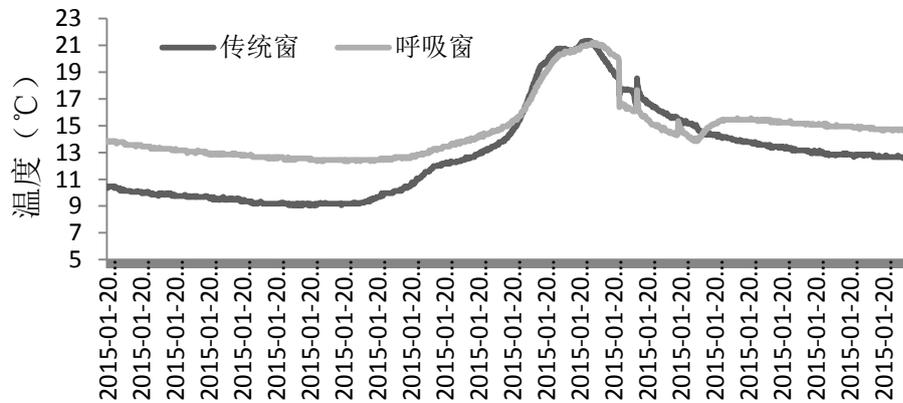


图 64 实测传统窗与呼吸窗室内温度对比（1月20日）

在冬季的实验数据中，还包括安装传统窗的房间与安装呼吸窗的房间的室温，实验结果表明，在不开空调的情况下，传统窗的房间与呼吸窗的房间室温相差 3~5°C，而且在实验期间，笔者走进两间房间的人体感觉也有很大差别，安装有呼吸窗的房间要比安装传统窗户的房间温暖许多。本论文挑选了 1 月 19 日与 20 日的温度数据（如图 63-64），从图中可以看出呼吸窗的保温效果。

5.3.3 气流测量结果



图 65 冬季模型气流测点

图 65 为冬季模型的气流测点，在测试气流速度时，采取了断面平均气流的方法，冬季模型所涉及到的气流断面有两个，一为底部缝隙，室外的冷空气进入，二为内层玻璃顶部的一个缝隙，供由空腔预热过的空气进入室内，补充新风。模拟的气流结果与实测的气流结果的对比情况见表 11。经测量，底部缝隙处气流进入的流速约为 0.06m/s ，与之前模拟结果中阴天底部缝隙的气流速度为 0.0306m/s 很接近，另外，内层玻璃顶部缝隙处的气流速度约为 0.24m/s ，也与模拟结果中相应的气流速度 0.256m/s 相差无几，从而验证了冬季模型气流结果的可靠性。

表 11 冬季阴天模拟与实测气流结果对比

流向	3 → 2	1 → 2	4 → 3	室外 → 4
模拟流速 (m/s)	0.256	0.02	0.073	0.0306
实测流速 (m/s)	0.24	0.03	0.09	0.06



图 66 夏季模型气流测点

夏季模型的几个测点位置如图 66 所示，分别在空腔的底部缝隙和顶部开口处，气流测量的工具为热球风速仪，测量方法采用断面平均流速法，测得的气流速度详见表 12。

表 12 夏季晴天气流结果（7月15日13:00）

流向	2→3	3→室外	1→2	4→3	室外→4
模拟流速(m/s)	0.0055	0.178	0.0162	0.519	1.43
实测流速(m/s)	0.00~0.01	0.15	0.02	0.35	1.1

从表中数据可以看出，虽然实测的各个断面的平均气流速度并不与模拟结果完全相符，但实测流速与模拟流速都在同一个数量级内，因此这个结果也从气流速度这个角度验证了模拟结果的合理性。

5.4 模拟与实验结果对比

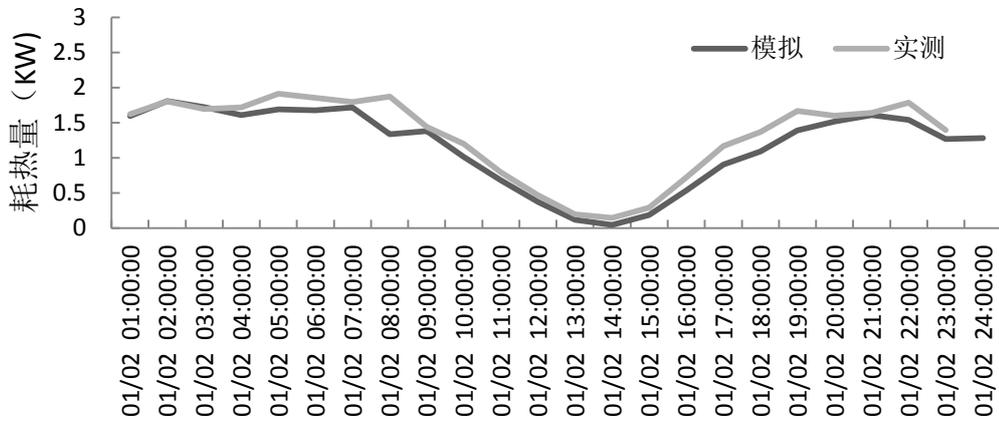


图 67 模拟与实测结果对比

论文的第五章分析了用 EnergyPlus 对其进行模拟的结果,为了验证模拟结果的准确性,本文还做了相关的实验与模拟结果进行对比,对比结果如图 67 所示。从模拟与实测结果的对比结果可以得知,模拟与实测的房间的耗热量拟合的很好,这一结果从耗热量的角度再次验证了模拟结果的合理性。

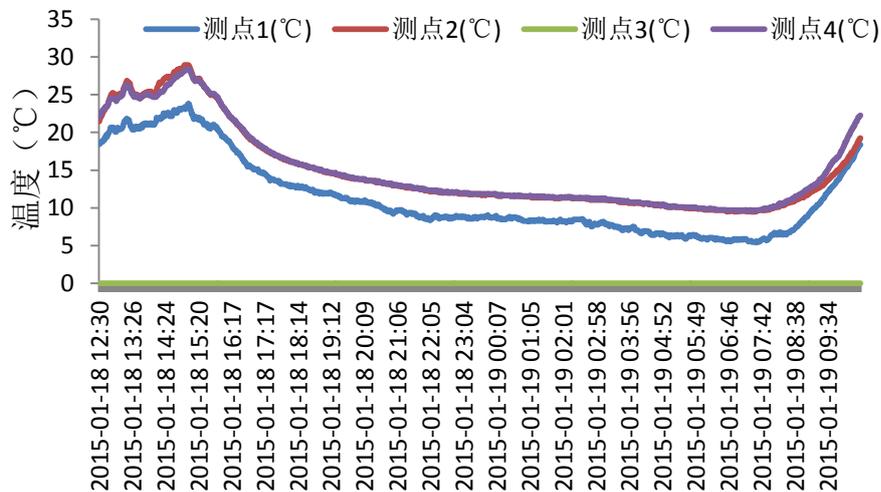


图 68 呼吸窗空腔内温度分布

图 68 表示了空腔中的 4 个温度测点分别测得的温度分布,其中测点 1,测点 2,测点 3,测点 4 分别对应的测点在图 69 中所示的 4 个位置。从图 68 中可以看出,在横向上,测点 1 与测点 3 是在同一水平线上的,这两个测点的温度几乎没有任何差别,同样的,测点 2 与测点 4 的温度值也无任何差别。空腔中的温度差别主要体现在纵向上,即测点 1/3 与测点 2/4 之间的温度。位于上方的测

点 2 与测点 4 的温度要比位于下方的测点 1 与测点 3 的温度高出 3-6℃，这正验证了之前所述的空腔中的传热模型，在空腔中，空气受到空腔的加热作用而上升，因此才会有温度差的存在，也证明了空腔中确实有气流的存在。并且，这一结果与 Jorge S.Carlos 等人在葡萄牙呼吸窗所做的实验数据一致（实验所在地为葡萄牙，空腔内温升 6℃）^[20]。

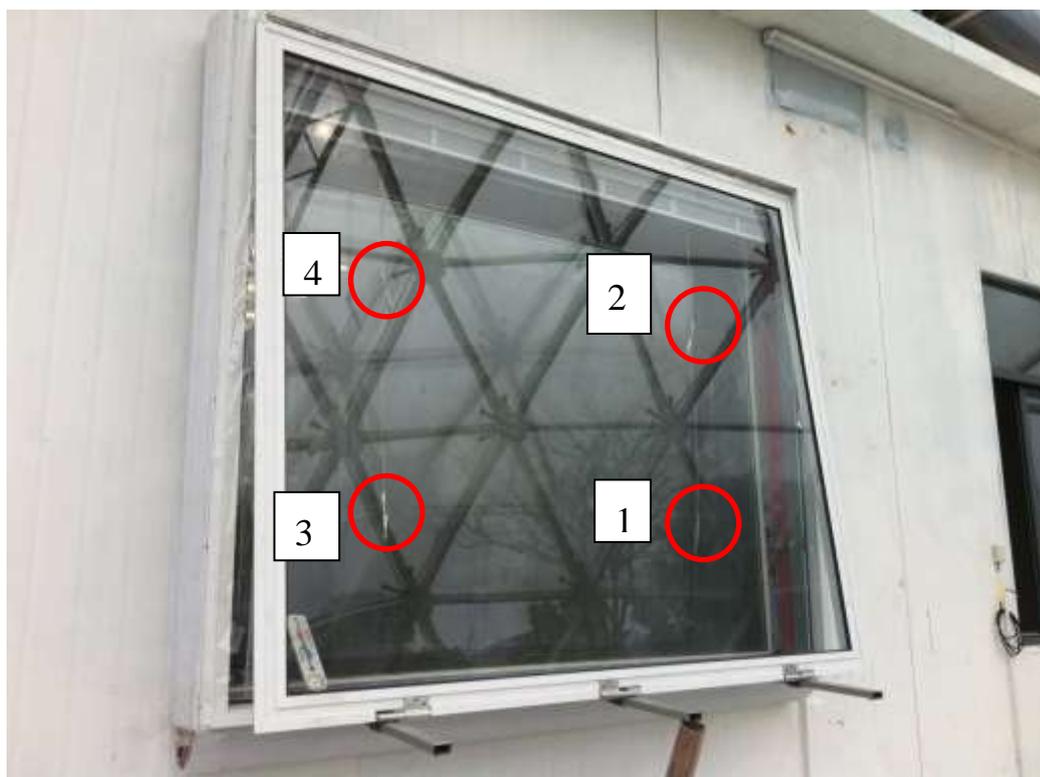


图 69 呼吸窗空腔的温度测点（图中红色圈出）

第六章 结论与展望

6.1 结论

本文的研究工作初步探讨了用 EnergyPlus 软件对被动式呼吸窗的模拟以及结果分析,并且用实验对比呼吸窗与传统窗户的能效,以此对模拟结果进行验证,并验证遮阳呼吸窗在实际情况中的节能效果。通过对模拟以及实验的结果进行分析,本文对遮阳式被动式节能呼吸窗进行了几点总结。

(1) 首先,本文使用 EnergyPlus 中的 Airflow Network 模块对其气流组织进行了模拟,发现对于夏季模型或冬季模型,呼吸窗空腔内的气流流量以及流速情况均在自然通风的合理范围之内,并且与前人对双层皮幕墙结构的理论分析以及实测结果也十分贴近,因此对呼吸窗的气流组织进行模拟得出的结论也可以从某种角度证明气流组织模型的准确性。通过对比安装有呼吸窗与安装有传统窗户的房间模型的温度模拟结果,可以发现,在整个制冷季内,在关闭 HVAC 系统的情况下,呼吸窗模型的室温比传统模型的室温低 4.5°C ,最大可以相差 $5-8^{\circ}\text{C}$ 。在制热季内,结果显示呼吸窗模型在夜晚的节能效果优于白天,且白天室外温度越低,节能效果越好。在夜间,当室外温度低至零下时,STS 模型仍可保持比室外温度高出 $3-4^{\circ}\text{C}$,但这一优势随着日出以及随之而来的太阳辐射的逐渐加强而渐渐减小。

(2) 本文还对比了夏季模型的冷负荷的模拟结果,由此探究内层玻璃顶部的缝隙对冷负荷的影响。当在过渡季节内打开内缝,会降低冷负荷,而在高峰时间段内打开内缝,会使得冷负荷急剧增加。因此,在过渡季节打开内层玻璃顶部的缝隙是一个很好的节能措施。在对不同的结构尺寸进行能耗模拟时,发现当空腔底部的缝隙宽度为 0.07 米时,冷负荷最低,整个曲线呈现 U 型。这是因为底部缝隙的宽度影响到气流从底部流入空腔的初始状态,当底部缝隙的宽度非常小时,这将对室外的空气通过底部缝隙流入空腔造成一定的难度,从而使呼吸窗的效果打折,而当底部缝隙的宽度过大时,则容易在底部入口处形成横向气流,从而无法使气流有规律地并且有效地形成竖向气流,同时带走遮阳百叶以及空腔内的积聚的热量。在研究另一个重要参数上悬角度时,发现若该角度过小,则影响夏季空腔内的通风情况,可能导致遮阳百叶上的热量未能及时带走引起过热;若该角度过大,则会导致空腔内气流不受限制,形成乱流。从模拟结果来看,不同上悬角度对电耗的影响不同,当该角度为 7° 时,电耗最低。在制冷季内,STS 模型均能达到 20% 以上的节能率。但其实 STS 呼吸窗在冷负荷高峰月份的表现

并不好，在制冷季内的节能率之所以能达到 20% 以上，很大程度上都是 STS 模型在过渡季所降低的冷负荷起到了很大的作用。STS 呼吸窗的模型在过渡季节 4、5、6、10 月的节能效果较好，特别是 4 月和 10 月，STS 呼吸窗表现出了很好的节能潜力。在对冬季模型的能耗进行分析时发现，温暖时期的总体节能量要小于较寒冷的一天。这是由于该呼吸窗模型在冬季的节能性体现在对室外冷风侵入引起的热负荷的减小，因此理论上讲，室外温度越低，此种呼吸窗的节能性越高。本文进一步通过模拟冬季模型在气候严寒的北欧地区芬兰的气候下的能耗，发现可以得出相同的结论，在最寒冷的一天，呼吸窗模型显示出了很大的节能能力。在对冬季模型的结构尺寸对能耗的影响分析中，发现对于冬季模型，下悬角度越小越好，而内层玻璃顶部缝隙越小越好，但要保证室内的新风量满足新风标准以保证空气品质。

(3) 其次，本文对安装有呼吸窗与安装有传统窗户的房间进行了为期一周的实验。对比二者的加热量，发现安装有呼吸窗的房间每天所减少的加热量大约在 1.1~2.4KW，每天的节能率约为 8~9%。在不开空调的情况下，对比两个房间的温度值，传统窗的房间与呼吸窗的房间室温相差 3~5℃。本文对冬季模型的各处断面的气流速度进行了测量，测量结果与模拟结果中相应的气流速度非常接近，从而验证了冬季模型气流结果的可靠性。对于夏季模型，所测得的各断面的气流速度也与模拟流速在同一数量级，因此从这一角度验证了 EnergyPlus 模型气流组织的合理性。同时，本文通过对空腔中 4 个温度测点的温度值的对比，发现位于上方的测点 2 与测点 4 的温度要比位于下方的测点 1 与测点 3 的温度高出 3-6℃，这正好验证了之前所述的空腔中的传热模型，在空腔中，空气受到空腔的加热作用而上升，因此才会有温度差的存在，也证明了空腔中确实有气流的存在。最后，本文对比了用 EnergyPlus 软件对呼吸窗模型的模拟结果与实验结果，发现二者曲线非常接近，再一次从能耗角度验证了模拟结果的合理性。

6.2 进一步工作的方向

本文的研究虽然取得了初步的成功，但依然任重道远，尚有许多有待进一步深入进行的研究工作，这里择其要者简要讨论如下：

1. 首先，本文对呼吸窗的模拟只采用了 EnergyPlus 一个软件中的 Airflow Network 模块，虽然用实验验证了其模拟的准确性与合理性，但在气流组织、温度的分布方面并没有给读者一个直观的理解，并且相较于 CFD 软件，Airflow Network 模块在模拟气流组织这个领域并没有形成很成熟的思路

与方法，正如第三章所述，在模型的建立过程中，有很多可能影响模拟结果的参数的输入都带有很强的主观因素与参考因素，因此在这一方面仍需要后人进一步的探索。

2. 其次，在本文对呼吸窗的实验部分仍有部分内容没有全部完成。由于实验台搭建的工期原因，本文只对冬季模型在其应用的气候条件下进行了实验，而未能够使得夏季模型的实验在最合适的夏季完成，而是在冬季通过玻璃球实验台内的 AHU 进行温度调节，但即使是冬季晴天的太阳辐射，也无法与夏季的太阳辐射强度相比，因此即使温度条件可以满足，但太阳辐射强度这一条件无法弥补，势必会对实验结果产生一些影响。
3. 由于时间的原因，本文尚未完成对呼吸窗的每一个结构尺寸进行最佳的优化，只是通过模拟的结果，分析出最优化的尺寸，然后通过实验所得数据，验证其与模拟结果的拟合度以及其节能性。但若时间允许，本实验还可以进一步深化对结构尺寸对能耗的影响进行验证，从而使实验结果更加可靠真实。

致谢

逾尺的札记和研究纪录凝聚成这么薄薄的一本，高兴和欣慰之余，不禁感慨系之。记得鲁迅在一篇文章里写道：“人类的奋战前行的历史，正如煤的形成，当时用大量的木材，结果却只是一小块”。倘若这一小块有点意义的话，则是我读书生活的最好纪念，也令我对于即将迈入的新生活更加充满信心。

在这里，我想感谢我的导师许鹏教授一直以来给我的关心，并且给了我一个很大的平台验证我的模拟结果。另外，还要感谢其他许多老师和同学对我的模拟与实验阶段中的帮助，尤其是李峥伟老师，韩延民博士对我在模拟过程以及传热模型的建立方面给出了很多的指导，史建国老师在实验台的施工以及数据平台的搭建方面也做出了很大贡献，以及叶昀旻同学等在实验过程中帮助我调整呼吸窗的尺寸，没有他们的帮助，可能我的硕士论文也会失色许多。

回想读书生活，已经整整二十个年头，到同济求学，攻读硕士学位也已快三年了。进入同济大学以来，深深醉心于一流学府的大家风范。名师巨擘，各具特点；中西融合，文质相顾。处如此佳境以陶铸自我，实乃人生幸事。

2015年3月

参考文献

- [1] 申健平; 双向通风窗的产品系列及运行模式的实验研究[D]. 哈尔滨工业大学; 2010: 20-21.
- [2] 陈一飞; 一种基于自然通风原理的建筑通风窗智能控制系统构建[J]. 电气自动化, 2008 (30): 49-50.
- [3] 于芳; 上海地区住宅建筑节能窗设计技术探讨[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [4] T-J.Chang,Y-F.Hsieh,H-M.Kao. Numerical investigation of airflow pattern and particular matter transport in naturally ventilated multi-room building. *Indoor Air*.2006 (16):136-152.
- [5] 魏景姝, 赵加宁, 陈清焰; 双向通风窗通风队室内空气品质的改善[J]. 建筑科学, 2011 (02): 69-71.
- [6] 曾臻, 李晓峰, 李丞. 太阳辐射下双层皮幕墙自然通风的实验研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(11): 1931-1936
- [7] 吴, 蔚, 雷持平. 夏热冬冷地区居住建筑节能窗传热系数和遮阳系数优化研究[J]. 建筑节能, 2010, (2): 47-49
- [8] 王振; 夏热冬冷地区双层皮幕墙的气候适应性设计策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [9] 王强, 黄义龙, 曹芹; 夏热冬冷地区“双层皮”玻璃幕墙节能技术研究[J]. 节能技术, 2006, 24 (1): 46-49.
- [10] 贴日丽; 用于半封闭式军用住宅的换气窗; 中国, 102061872[A], 2010-11-23.
- [11] 裴刚, 周天泰, 季杰, 何伟, 何苗苗; 两种新型太阳能通风窗在香港地区的实验研究[J]. 太阳能学报, 2009 (30): 282-286.
- [12] 陶爱荣. 一种新型通风换气装置. 制冷与空调. 2009(9). 41-43.
- [13] 欧阳沁, 朱颖心; 北方地区住宅冬季通风换气方案研究. 技术交流. 2004(6) 26-28.
- [14] J.R.Gosselin; A ventilated window for Indoor Air Quality Improvement in Residential Buildings. M.Sc. Thesis, School of Mechanical Engineering, Purdue University.2006
- [15] J.R.Gosselin, Q.Y.Chen; A computational method for calculating heat transfer and airflow through a dual airflow window. *Energy and Buildings*. 2008(40):452-458.
- [16] K.A.R.Ismail,J.R.Henriquez; Simplified model for a ventilated glass window under forced

- airflow conditions. *Applied Thermal Engineering*.2006(26):295-302.
- [17] Gian Vincenzo Fracastoro, Guglielmina Mutani, Marco. Perino; *Energy and Buildings*. 2002(34):817-827
- [18] Appelfeld D, Svendsen S. Experimental analysis of energy performance of ventilated window for heat recovery under controlled conditions[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(11): 3200-3207.
- [19] Caciolo M, Cui S, Stabat P, et al. Development of a new correlation for single-sided natural ventilation adapted to leeward conditions[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 60: 372-382.
- [20] Carlos J S, Corvacho H, Silva P D, et al. Real climate experimental study of two double window systems with preheating of ventilation air[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(6): 928-934.
- [21] Carlos J S, Corvacho H, Silva P D, et al. Modeling and simulation of a ventilated double window[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(1): 93-102.
- [22] Kim D W, Park C S. Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(12): 3635-3645.
- [23] Ismail K A R, Henriquez J R. Two-dimensional model for the double glass naturally ventilated window[J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2005, 48(3): 461-475.
- [24] La Roche P, Milne M. Effects of window size and thermal mass on building comfort using an intelligent ventilation controller[J]. *Solar Energy*, 2004, 77(4): 421-434.
- [25] Juan Zhou, Youming Chen; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 1321–1328
- [26] 蒋骞, 龙惟定. 双层皮玻璃幕墙建筑的能耗分析和优化设计[J]. *暖通空调*, 2007, 36(11): 58-63.
- [27] Jorge S. Carlos, Helena Corvacho, Pedro D. Silva, J.P. Castro-Gomes; Heat recovery VS solar collection in a ventilated double window; *Applied Thermal Engineering* 37 (2012) 258-266
- [28] Jingshu Wei, Jiading Zhao, Qingyuan Chen; Energy performance of a dual airflow window under different climates; *Energy and Buildings*, 42(2010):111-122.
- [29] Jingshu Wei, Jiading Zhao, Qingyuan Chen; Optimal design for a dual-airflow window for different climate regions in China; *Energy and Buildings*, 42(2010):2200-2205.
- [30] N.K.Bansal, Jyotirmay Marthur, Sanjay Mathur, Meenakshi Jain. Modelling of window-sized solar chimneys for ventilation. *Building and Environment*. 2005(40):1302-1308.

- [31] M.E. McEvoy, R.G. Southall, P.H. Baker, Test cell evaluation of supply air windows to characterise their optimum performance and its verification by the use of modelling techniques, *Energy and Buildings* 35 (2003) 1009-1020.
- [32] ISO, International Organization for Standardization, 2003; Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices e Detailed Calculations (2003) ISO 15099.
- [33] Jorge S. Carlos, Helena Corvacho, Pedro D. Silva , J.P. Castro-Gomes; Modelling and simulation of ventilated window. *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 93-102
- [34] Manz Heinrich; Total Solar Energy Transmittance of Glass DoubleFacades with Free Convection [J].*Energy and Buildings*, 2004,36(2):127-136.
- [35] Nassim Safer;Monika Woloszyn;Jean Jacques Roux; Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin facade equipped with a venetian blind [J].*Solar Energy*,2005,79(2):193-203.
- [36] Manz H;Frank T; Thermal simulation of buildings with double-skin facades [J]. *Energy andBuildings*,2005,37(11):1114-1121.
- [37] 岑显荣; 詹杰民; 杨仕超; 马扬; 双层玻璃幕墙的 CFD 模拟与设计优化[J]; 中山大学学报, 2008, 47 (2): 18-21
- [38] XU Xiaoli;ZHAO Yang; Natural ventilation in the double skin facade with venetian blind [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(8):1498-1504.
- [39] 袁圆. 双层皮玻璃幕墙热工性能模型与实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [40] Poirazis Harris. Double skin facades for office buildings [M]. Lund University, 2004.
- [41] SAELENS D;ROELS S;HENS H; Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(4):638-650.
- [42] ASHRAE Handbook Fundamentals, ASHRAE, 2001.

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

陈璐, 女, 1990 年 1 月生。

2012 年 7 月毕业于重庆大学 建筑环境与设备工程专业 获学士学位。

2012 年 9 月入同济大学读硕士研究生, 攻读硕士学位。

已发表论文:

- [1] 陈璐, 许鹏, 叶昀昀. 一种变季节遮阳呼吸窗的模拟与分析. 建筑节能, 2014, Vol. 42 (283) :37-46

待发表论文:

- [1] Peng Xu, Yang Shen, Lu Chen, Jiachen Mao, Eric Chang, Ying Ji. ASSESSMENT OF ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES RETROFITTED TO EXISTING PUBLIC BUILDINGS IN CHINA. 《Energy Efficiency》. 已接受, 等待见刊。