



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

自然通风在上海民用建筑中的利用 潜力研究

姓名：王龙

学号：0920030154

所在院系：机械工程学院

学科门类：土木工程

学科专业：供热、供燃气、通风及空调工程

指导教师：潘毅群 教授

二〇一二年五月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of engineering

Study on Application Potential of Natural Ventilation in Civil Building in Shanghai

Candidate: Long Wang
Student Number: 0920030154
School/Department: Mechanical Engineering
Discipline: Civil Engineering
Major: Heating, Ventilating and Air
Conditioning Engineering
Supervisor: Prof. Yiqun Pan

May, 2012

自然通风在上海民用建筑中的利用潜力研究

— 1 —

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

摘要

建筑节能以及室内空气品质的改善是当今研究的热门课题,自然通风作为一种有效通风方式,相对于传统的机械通风,在改善室内空气品质和节能降耗方面具有优势。本文将针对上海地区民用建筑采用自然通风的实际潜力及节能效果展开分析和研究。

论文首先讨论了自然通风的各种影响因素,再利用 Fluent 软件分别分析了建筑表面风压系数受建筑面积、建筑长宽比、室外来流风向、建筑高度以及水平相对位置等因素的影响情况、不同类型外窗的流量系数受窗户面积、窗户高宽比、窗户开度以及窗户两侧温差等因素的影响情况和内门的流量系数受门面积、门的高宽比以及门的开度等因素的影响情况,并利用 SPSS 软件进行多元回归分析统计得到各参数受相应因素的影响规律,为快速、量化地计算建筑自然通风流量提供了依据。

然后,对某一典型办公建筑,根据上海典型年气象数据,计算出该建筑采用自然通风时的通风量,并根据气象数据以及室内热舒适范围统计得到全年的自然通风可利用小时数。最后,根据统计得到的自然通风使用时间表,针对前面讨论的典型办公建筑,利用 EnergyPlus 软件模拟计算了采用自然通风后全年的运行能耗的节省,从而确定采用自然通风的节能潜力。

关键词: 自然通风, 民用建筑, 风压系数, 流量系数

ABSTRACT

Building energy saving and indoor air quality are two hot research topics nowadays. Natural ventilation, as an effective ventilation means, has an advantage in improving indoor air quality and saving energy than conventional mechanical ventilation. This thesis aims to analyze the potential of application and energy saving of natural ventilation in civil buildings in Shanghai area

The thesis first discusses the various factors affecting natural ventilation, and then uses the software Fluent to numerically analyze the impact on building outside surface wind pressure coefficient by such factors as floor area, building aspect ratio, wind direction, building height, as well as relative position. Meanwhile, it analyzes the influence of discharge coefficient of various types of exterior windows by window area, window aspect ratio, opening angle, temperature difference between outdoor and indoor. The same analysis is done on interior doors as exterior windows. Multiple linear regression analysis is carried out using software SPSS to find the influencing principles of corresponding factors. The regression formula obtained can be used to calculate natural ventilation flow rate rapidly and quantitatively.

Then the thesis studies the application potential of natural ventilation in a typical office building in Shanghai. The available hours of natural ventilation is calculated based on the Shanghai typical meteorological year data and indoor thermal comfort temperature and humidity range. Finally, energy simulation model is developed using EnergyPlus to estimate the annual energy save of employing natural ventilation compared to conventional mechanical ventilation.

Key Words: natural ventilation, civil building, wind pressure coefficient, discharge coefficient

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 国外研究现状及发展动态.....	2
1.2.2 国内研究现状及发展动态.....	6
1.3 研究目的与意义以及主要内容.....	9
1.3.1 研究目的与意义.....	9
1.3.2 本课题主要研究内容.....	10
第 2 章 自然通风的基本原理.....	11
2.1 自然通风的机理.....	11
2.1.1 自然通风的热压作用.....	11
2.1.2 自然通风的风压作用.....	14
2.1.3 自然通风的热压和风压的耦合作用.....	16
2.2 自然通风的研究方法.....	16
第 3 章 自然通风影响因素分析研究.....	19
3.1 建筑表面风压系数的影响因素分析.....	19
3.1.1 研究方法及模型参数.....	19
3.1.1.1 模型及计算区域.....	20
3.1.1.2 湍流模型.....	20
3.1.1.3 边界条件.....	22
3.1.2 各因素对风压系数影响分析.....	22
3.1.2.1 多元线性回归分析.....	23
3.1.2.2 风压系数多元回归结果.....	25
3.1.2.3 影响因素分析.....	26
3.1.3 周围建筑的影响分析.....	28
3.2 建筑外窗流量系数的影响因素分析.....	30
3.2.1 研究方法及模型参数.....	31

3.2.2 平开窗流量系数影响因素分析.....	32
3.2.2.1 多元线性回归分析.....	32
3.2.2.2 影响因素分析.....	34
3.2.3 推拉窗流量系数影响因素分析.....	35
3.2.3.1 多元线性回归分析.....	36
3.2.3.2 影响因素分析.....	38
3.2.4 悬窗流量系数影响因素分析.....	40
3.2.4.1 多元线性回归分析.....	40
3.2.4.2 影响因素分析.....	42
3.3 内门流量系数的影响因素分析.....	44
3.3.1 研究方法及模型参数.....	44
3.3.2 多元线性回归分析.....	45
3.3.3 影响因素分析.....	46
3.4 实验比对.....	47
3.5 本章小结.....	50
第4章 自然通风利用潜力分析研究.....	51
4.1 自然通风利用潜力的研究方法和评价指标.....	51
4.2 上海地区办公建筑自然通风利用潜力的研究.....	53
4.2.1 上海地区的气候特性.....	53
4.2.2 室内热舒适性范围.....	58
4.2.3 上海地区的自然通风利用潜力的研究.....	59
4.2.3.1 通风换气量计算.....	60
4.2.3.2 自然通风可利用的室外条件计算.....	63
4.2.3.3 自然通风可用小时数计算.....	66
4.2.4 自然通风利用潜力的影响因素分析.....	67
4.2.4.1 室内总得热量的影响.....	67
4.2.4.2 最大通风换气量.....	67
4.3 自然通风的节能潜力研究.....	68
4.3.1 建筑模型.....	68
4.3.1.1 建筑几何模型.....	68

4.3.1.2 建筑结构热工特性.....	69
4.3.1.3 室内负荷与运行时间表.....	69
4.3.1.4 空调系统.....	70
4.3.1.5 新风量与漏风率.....	72
4.3.2 能耗结果及分析.....	72
4.4 本章小结.....	72
第5章 结论.....	73
致谢.....	75
参考文献.....	76
附录 A 各层 AHU 运行时间表.....	79
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	85

符号说明

符号	物理量	单位
ε	窗口的局部阻力系数	1
v	速度	m/s
ρ	空气密度	kg/m ³
ΔP	窗口两侧的压力差	Pa
μ	窗口的流量系数	1
Q	窗口处空气体积流量	m ³ /s
A	面积	m ²
g	重力加速度	m/s ²
H	窗户的高度	m
ρ_O	室外空气密度	kg/m ³
ρ_R	室内空气密度	kg/m ³
T_O	室外空气温度	K
T_R	室内空气温度	K
α	空气膨胀系数	1
D	窗户宽度	m
m	窗口处空气质量流量	kg/s
C_p	风压系数	1
P_H	热压	Pa
P_W	风压	Pa
Q_H	热压引起的空气流量	kg/s
Q_W	风压引起的空气流量	kg/s
L	建筑长宽比、窗户高宽比	1
θ	风向角度	°
h	建筑高度	m
n	水平相对位置	1
β	窗户、门的开度	°
t_{comf}	舒适温度	°C
$t_{\text{comf,max}}$	最大舒适温度	°C
$t_{\text{comf,min}}$	最小舒适温度	°C
$t_{\text{a,out}}$	室外月平均温度	°C

V	体积	m^3
$Q_{内}$	室内热源散热量	W
$Q_{围}$	围护结构得热量	W
$Q_{日射得热}$	透过窗户的日射得热量	W
Q_{min}	建筑最小通风换气量	m^3/s
$T_{o, max}$	室外最高自然通风空气温度	K
$T_{o, min}$	室外最低自然通风空气温度	K
C	空气定压比热容	$kJ/kg.K$
R_p	人员所需新风量	m^3/h
P	室内人员数	个
R_A	地板稀释所需新风量	m^3/h
A_{floor}	地板面积	m^2
D_i	室内绝对湿度	$kg(水)/kg(空气)$
D_o	室外绝对湿度	$kg(水)/kg(空气)$
$D_{内}$	人员散湿量	kg/s

第1章 绪论

1.1 研究背景

由于社会的发展和人类的需求,越来越多的民用建筑被人类建造使用。特别是在城市,由于人口密度大,用地资源有限,民用建筑逐步向高层和超高层方向发展。其中很多民用建筑特别是办公建筑等由于室内人员、设备、照明等负荷较大,必须依靠机械空调系统或自然通风系统来改善室内热环境。同时,由于出于加强建筑密闭性、安全性等各方面的原因,很多建筑为全封闭玻璃幕墙结构。此时室内人员呼出的 CO_2 、室内各种设备、家具散发出的有害物质以及室内的粉尘微粒若得不到有效的稀释和排出,室内空气品质将会恶化,人们长时间呆在这种环境中会有沉闷、昏昏欲睡的感觉,工作效率降低。因此,要通过持续稳定地向室内送入室外新风和设计合理的气流组织才能改善室内空气品质。

目前大部分民用建筑特别是办公建筑中都是采用机械通风空调系统来调节室内热环境和改善室内空气品质。机械通风空调系统可以持续稳定地向室内提供一定的送风量,有效地调节室内热环境,改善室内的热舒适。同时,通过送入新风来稀释污染物,保证室内的空气品质。

但是,办公建筑采用全机械空调通风系统带来的问题也越来越明显。首先是建筑能耗居高不下,而建筑能耗中的空调能耗占的比例又相当大。研究表明^[1],办公建筑的空调能耗现在能占到整个建筑的运行能耗的30%~45%,有的甚至超过了一半。而我国由于人口众多,能源消费很高,各种资源显得相对匮乏,于是国家大力提倡节能。建筑节能是其中非常重要的一个组成部分。因此,我们在保证室内热舒适性和空气品质的情况下应尽量减少机械空调系统的使用,并尽量采用其他不消耗或少消耗能源的调节方式来为人们提供舒适的室内环境。其次,由于室内新风设计风量不足、气流组织不合理或者室外新风经处理从风管中送入室内失去“新鲜度”,人们总会从生理上和心理上对室内空气品质不满意,长时间下来室内人员容易患上“空调病”,因而急切需要一种新的通风方式来改善目前办公建筑中存在的这种状况。

于是,自然通风这种古老的技术近些年又得到了大家的广泛重视和应用。自然通风可以直接向室内提供新鲜、清洁的室外新风,稀释室内污染物浓度,改善室内空气品质。同时,室外直接进入的“自然风”存在着不同于“机械风”的特定频谱和湍流强度,人们对其有着特别的“清新”、“自然”、“舒适”和“愉悦”的吹风感受^[2]。人们可以根据自己的需要和当前的室内环境自己决定是否要采用

自然通风,这可以满足人与自然交往的心理需求,能提高人的舒适感。另外,采用自然通风可以大大节约空调能耗,减少建筑的运行能耗。例如 Kolotroni 等人^[3]通过对英国、法国等地的多个建筑进行长期的监测,得到采用自然通风后能耗降低近 40%~50%。

但自然通风受室外气象条件影响很大,在不同的季节和不同的时间,可利用的室外“自然风”和建筑的自然通风系统效果会有很大的差异。同时,由于周边地区地形地貌以及建筑分布等因素的影响,自然风具有不稳定性和不可控制性。并且现在的民用建筑体积越来越庞大,例如很多办公建筑分有内外区,自然通风很难对内区环境进行调节。于是仅通过自然通风调节室内热环境和改善室内空气品质还不行,而要针对各类建筑的特性,将自然通风与机械通风进行有效的结合,即为混合通风系统,在不同的季节或一天中的不同时间,根据室外气象条件,利用自控系统,合理地在机械通风模式和自然通风模式之间进行切换或联合运行,在保证室内热舒适和空气品质的同时使能耗最低。

因此,量化分析自然通风的利用潜力和节能效果非常重要。本文将主要讨论上海地区民用建筑中自然通风的利用潜力情况,给出定量化的计算方法及公式,以便建筑设计人员在设计初期即可根据需要合理选择建筑朝向、设计建筑窗户大小及位置等,从而最大化地利用自然通风,减少机械通风的使用。

1.2 国内外研究现状

近几年来,国内外对自然通风的相关研究越来越多。主要集中在几个方面:第一、关于自然通风特性的研究,主要采用 CFD 模拟以及风洞实验等方法进行基础理论研究。第二、混合通风系统设计和控制策略的相关研究,即如何有效的使用自然通风和机械通风,充分利用它们各自的优点。第三、自然通风以及混合通风系统效果的实测及分析研究,主要测量及分析自然通风在改善室内空气品质和降低建筑运行能耗等方面的实际效果。

1.2.1 国外研究现状及发展动态

(1) 关于自然通风特性方面的研究

O.Zeidler 等人^[4]从理论上分析研究,指出单开口热压自然通风可以采用置换气流方法进行计算。计算表明,在夏季,通过单开口热压自然通风作用可以减小室内热负荷高达 $35\text{W}/\text{m}^2$ 。

G.H.Gan^[5]研究了单侧通风室外新风进入室内的“有效深度”,他利用 CFD 模拟的方法得到了夏季工况下某单区单开口模型的流场分布、室内温度场以及室

内平均空气龄，对室外新风的影响进行了多方面的评价。结果表明，基于热舒适要求的“有效深度”与基于空气品质的“有效深度”并不一致，夏季时室内热舒适性是限制房间进深的主要因素。文中最后还分析了开口特性以及室内得热量对单侧通风“有效深度”的影响情况。

Y. Jiang 等人^[6]通过实验和 CFD 模拟对比分析的方法，研究了单侧热压大开口自然通风室内外气流特性和通风效果。CFD 模拟采用了 RANS 和 LES 两种模型，并使用了实验数据对这两种模型的计算结果进行了对比和校正。结果表明，LES 模型计算的结果更准确些。

C. Allocca 等人^[7]利用 CFD 技术研究了单侧自然通风在热压、风压以及热压和风压的耦合作用下的通风换气效果和改善室内空气品质情况，并将模拟结果与经验分析结果进行了比较。结果显示，热压作用下的自然通风的 CFD 模拟结果与经验分析结果相差在 10% 以内，而同时有热压和风压作用时，其 CFD 的模拟结果与经验分析结果相差达 25% 左右。

D.J. Wilson 等^[8]使用示踪气体对一间单开口热压自然通风的测试房间进行了实测。在不同的室内外温度下，测试室内外温度差从 0.5K 到 45K 之间的热压通风效果。他同时提出了一种密度变量紊流模型，该模型预测结果与实际结果吻合很好。

E. Dascalaki 等人^[9]对 52 个单开口的热压自然通风建筑模型进行了风洞实验，然后用 CFD 软件对这些实验工况进行了模拟计算。通过对传热和传质的分析和讨论，提出了一个预测单开口热压自然通风计算的新模型。

G.M. Stavrakakis 等人^[10]利用实验和 CFD 模拟方法分析了贯流通风的效果。他们搭建了一个模型实验台，该实验台相对的两侧不对称位置处各有一个开口，并在夏季典型日测量了实验区域内的温度场和速度场。之后他们又利用 CFD 技术采取标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型对贯流通风的效果进行了模拟，结果与实验测量结果吻合的很好。

S.R. Livermore 等人^[11]分析研究了利用烟囱进行自然通风的效果，他们对一由烟囱联通的两层建筑进行了分析，在上层建筑处由于设置了热源，加热了该区域空气温度并引起该区域热空气沿烟囱上浮，这同时导致了下层区域的空气流向上层区域，也即形成了通风换气作用。研究表明，该烟囱通道形成的自然通风量与上下层通风开口的大小之比以及烟囱的高度有关。

T.S. Larsen 等人^[12]利用风洞实验研究了热压以及风压作用下的单开口自然通风情况。结果表明，自然通风的主要作用力是热压还是风压跟热压和风压的相互大小以及风向有关，通过测量通风口处的速度分布也验证了这一结果。

M.M. Eftekhari 等^[13]研究比较了采用计算和实测两种研究方法研究在单开口

热压自然通风测试房间中的气流分布。测试房间位于房屋比较密集的地段,采用风洞实验和实测都表明了测试房间周围的风向在西向和东向受很大的限制。为了研究室内的气流,测量了开口处的压强、风速、室内四个区域六个不同高度处的空气温度和风速。实验结果表明不管是冬季还是夏季新鲜空气都是从开口下部进上部出。作者还分别应用了气流模型和热模型预测了空间中的气流分配和热舒适,预测结果和模拟结果都与实测结果吻合很好。

J. Seifert 等人^[14]利用 CFD 的方法对传统简化的理论方法进行风压作用下的自然通风流量计算进行了分析和验证。针对一单区两开口的建筑,作者分析了自然通风的流量受建筑形状、尺寸以及两开口的相对位置的影响情况。结果表明,当通风口较大时,自然通风流量受室外及室内风场的影响。当建筑的开口大小不超过一定值(值是变化的,与室外来流风向与室内主导流场方向的夹角有关)时,简化的理论计算方法在计算风压作用下的自然通风时误差不超过 10%。

M.Z.I. Bangalee 等人^[15]研究了单区四开口建筑的风压作用下自然通风的情况,采用 CFD 模拟与示踪气体实验对比的方法,论证了 CFD 模拟的有效性。之后,作者利用 CFD 模拟分析了自然通风空气流动机理,得到了建筑各通风口的平均风速、表面风压分布以及风压系数的情况。

P. Heiselberg 等^[16]研究了建筑使用悬窗和平开窗两种窗户形式进行自然通风时的窗口流量系数情况,分析了它受窗户两侧的压差以及温度差的影响情况。然后,为评价自然通风的室内热舒适性,建立了一个半经验流动模型,用于考虑射流及室内空气分层作用。

(2) 混合通风系统设计和控制策略的相关研究

T. Chikamoto 等人^[17]对日本明治大学内一栋 23 层的办公建筑进行了混合通风系统设计。该系统在供暖或制冷季节使用机械通风系统,而在过渡季节使用自然通风系统。该自然通风系统是利用风压和热压的共同作用。建筑每层四个面均设有进风口,空气进入室内后沿管道井上升从顶部排出。其中在第 18 层设了一个排风夹层,用于加大风压作用。

J.S Won 等人^[18]对位于韩国汉城的一公寓利用阳台设计的混合通风系统进行了分析研究。该系统在春节和秋季可通过阳台窗户和室内门形成贯流通风。在风压不够时,可利用厨房和浴室的风机辅助排风。在制冷季节,风在进入阳台后利用风机盘管系统冷却之后在送入室内。而在供热季节,送风要先在阳台处预热。

D. Jreijiry 等^[19]对一住宅建筑利用传统的机械通风系统和混合通风系统的效果进行了分析研究,并对混合通风系统提出了两种控制策略—基于人员个数和基于室内 CO₂ 含量,通过 MATLAB/SIMULINK 对四种不同气候条件下的全年运行情况仿真研究,得出两种控制策略下的混合通风系统由于可以利用自然通

风,比传统的机械通风系统能提供更好的室内空气品质,并且风机能耗更少。

D. M. Utzinger^[20]对美国 Wisconsin 南部三栋建筑的混合通风系统性能进行了分析,研究表明合理的自然通风设计和恰当的控制策略对混合通风系统的运行效果有很大的帮助。

(3) 自然通风及混合通风系统效果的分析研究

E. Mouriki 等^[21]对 Concordia 大学一有中庭的建筑自然通风系统进行了研究。结果表明, Montreal 地区在 5~10 月份的自然通风利用潜力很大,特别是 6 月、8 月及 9 月,可使用时间达到该月的 45~51%。

K. Niachou 等^[22]于 2002 年夏季对雅典的三栋位于两种不同街道的市内典型公寓进行了流场和室内环境的实验研究。通过使用两种示踪气体 N_2O 和 SF_6 分析了自然通风、机械通风和混合通风三种策略下室内换气效果。实验结果表明,尽管会受公寓周围其他建筑形成的“峡谷”的影响,但当建筑有两个及以上的可开启外窗形成穿堂风时,自然通风的效果还是很明显,能够产生较大的通风换气率。

M.H. Kim 等人^[23]利用 CFD 南韩某公寓一采用自然送风机械排风的混合通风系统进行了分析研究。他们选取了冬季供热工况以反映居民们平时最恶劣情形下的室内环境状况。模拟时通风量选取了 30、60 和 $120m^3/h$ 三种值,并以室内气流、温度和 CO_2 含量等指标评价室内舒适度。结果表明,通风量不仅是能反映室内舒适度的一个重要指标,同时还能反映建筑节能。0.7 的通风换气次数是公寓内人员所需的最小通风量。当通风量为 $60m^3/h$ 时,室内人员感觉较舒适;而当通风量为 $30m^3/h$ 和 $120m^3/h$ 时,室内人员不再感觉热环境和气流舒适。

Z.Q. Zhai 等人^[24]认为,尽管大家都认为自然通风是一种有效节能的技术,但是一直缺乏合适的模拟工具来分析自然通风在提供可接受的室内热环境时产生的实际效果。于是他们通过评价当前的几种热模型-通风模型的准确性和可行性,分析研究如何提高在建筑设计中使用自然通风和混合通风。由于各种模型相似,作者选取了 EnergyPlus 来分析了三栋采用混合通风的实际建筑,并与之前获得的测量数据进行比较。结果表明,当前的热模型-通风模型:送风机和排风机的控制存在缺陷,不能实现全部实际的功能;对水平开口和区域之间的全开口不能模拟;对多层建筑,可能高估了热压作用产生通风作用。同时,研究还表明,更多的建筑和实验数据对模型的准确校正很重要,包括实时的温度、风速和风向、太阳日照情况等气象参数、建筑通风的体积流量、通风口的有效通风面积和流量系数等。

S. Ezzeldin 等^[25]利用气候分析法和动态热模拟方法对干燥气候地区办公建筑的混合通风适用性进行了研究。通过对四个不同地区的单区域办公建筑混合通

风模式研究,并改变室内热源值,对比分析气候分析法和动态热模拟方法的研究结果。结果表明,混合通风方式不仅可以保持室内良好的热环境,而且可以减少能源消耗。

F. Cron 等^[26]以法国十个城市的气象参数对某一三层南向的教室的机械辅助式自然通风系统运行效果进行了分析,并将它与有一个低耗排风机但没热回收装置的机械通风系统、以及有两个风机和热回收装置的机械通风系统进行比较。结果表明,这一种混合通风模式能改善室内空气质量,而其节能潜力与气候条件及混合通风的控制策略有很大关系,机械辅助式自然通风比有一个低耗排风机但没热回收装置的机械通风系统要节能,而只有在那些地中海沿岸城市才比带有热回收装置的机械通风系统节能。

C. Szikra^[27]分析了英国一生态办公建筑的混合通风利用效果。该通风系统充分利用了晚间通风、单侧通风、贯流通风和烟囱通风,在夏季炎热时候时可利用太阳能烟囱加强通风,同时在风道中设有风机备用。实测结果表明,在冬季室内热舒适性满足要求,新风的换气率为 0.75ach,室内 CO₂ 浓度刚超过 1000ppm 一点。而在夏季,换气率 2~3ach,极端情况达到 1ach,而室内温度在 25~28℃ 范围内,并且 CO₂ 浓度为 600~800ppm。

T. Frank 等人^[28]介绍了瑞士一栋六层有中庭的办公建筑使用自然通风系统的情况,重点分析研究了该建筑在连续 17 天在室外最高温度达 35℃ 的情形下室内的舒适性和室内空气品质的情况。该建筑白天使用一地下换热器来预冷室外高温空气,送入室内可减少 7~10℃。而晚间利用烟囱作用形成自然通风来降低室内空气。研究结果表明,室内热舒适性和空气品质均满足瑞士的相关标准。

1.2.2 国内研究现状及发展动态

国内学者对自然通风的各类相关研究也有很多,主要有:

(1) 自然通风特性的相关研究

林文^[29]对长沙某典型办公建筑单开口热压作用下自然通风进行了实验和模拟分析研究。对不同的开口面积、室内外温差和热源条件下采用 CO₂ 示踪其他的方法测得自然通风量和房间不同位置处的温度分布情况。同时也利用 Fluent 软件进行了模拟分析。结果表明,单开口热源自然通风的通风量随着开窗面积、室内外温差和热源的增加而增大,自然通风的降温效果也随着开窗面积、室内外温差和热源的增加而越来越明显。

赵平歌等^[30]某具有平面热源和两个通风口的建筑模型进行了模拟研究,通过改变平面热源的大小、室外风速的大小以及风口的位置,得到它们各自对室内温度场分布的影响情况,分析了热压和风压共同作用下自然通风的效果。结果表

明,室内存在一个温度相对较低的过渡区,该区域有利于自然通风的降温作用。

李红祥^[31]对封闭房间和开口房间的外墙风压进行了模拟研究,并通过改变几个不同开口的大小、开口的相对位置以及房间的长度,分析了室外气流从房间外到房间内的整个流动过程,结果显示不同的状况下气流流动特性不同,分析了不同状况下的风压自然通风阻力特性。

隋学敏等人^[32]对某具有双热源的建筑自然通风进行了模拟分析,在室内热源值不变的前提下,通过改变两内热源之间的间距分析其对热压自然通风的影响情况,同时对比分析了单热源和双热源两种情况下室内温度场和速度场的差异,为建筑的自然通风设计提供了一些参考。

李玉国等^[33]对两风口和三风口的单区建筑、两区建筑和大风口建筑进行了分析研究。通过例证揭示了自然通风的多样性,提出了适用单区建筑、两区建筑和大风口建筑自然通风的研究方法,得出了基于压差的风量计算模型,并开发出了多区多开口的自然通风计算程序 MIX,这为研究多区多开口的自然通风提供了较好的平台。

梁传志等^[34]利用 CFD 技术对不同风速、不同建筑高度下的建筑风压下自然通风的效果进行了模拟研究,得到了单体建筑的风压差系数的分布规律。结果显示,风压作用下的自然通风最适宜的区域为建筑高度的 4/5 处,建筑迎风面中部的风压自然通风效果要好于建筑两侧处。同时,自然通风效果会随着建筑高度和风速的增大而更好。

李安桂等人^[35]利用实验方法研究了太阳能烟囱在强化自然通风的效果,结果表明自然通风量会随着烟囱宽度和热流密度的增大而增大,气流速度会随着热流密度的增大而增大,而随着烟囱宽度的增大而减小。

丁勇等人^[36]利用数值分析方法对重庆市几种典型的建筑户型的自然通风效果进行了分析研究,通过改变建筑布局 and 建筑朝向,分别得到各种工况下的室内温度场、速度场和 PMV 的分布情况。结果表明,通过改变建筑朝向和局部改变建筑室内布局,可使室内气流从 0.24m/s 增强到 0.82m/s,室内温度也下降了一些,室内 PMV 值更接近舒适状态时的值,显著改善了自然通风的效果。

王亮等^[37]研究了外场风速和建筑空间结构对自然通风效果的影响情况。他们利用 CFD 技术,以时间加权平均浓度和短间接接触浓度等指标来评价分析了稳态和非稳态外场风速情况下的室内自然通风效果,结果显示两种不同的风速边界条件对自然通风的效果影响很大,并与具体的建筑结构相关。

周军莉等^[38]对影响自然通风开口流量系数的因素进行了分析研究,具体分析了开口的长宽比、开度、内外压差和温差等因素的影响情况。结果表明,对所有开口的流量系数使用常值进行自然通风的设计技术具有局限性,不同情况下开

口的流量系数存在差异。

范卫军等人^[39]利用 CFD 技术对天津某生态办公建筑在过渡季节的建筑外表面风压进行了模拟计算,并以模拟得到的风压为边界条件,计算了建筑各房间内的自然通风效果。结果显示,该建筑外区那些具有两侧开口的房间室内的通风换气效果较好,而对于那些外区单侧开口的房间和内区的房间,要充分利用建筑外形的凹凸变化、外开口距离、与通风走廊连通的内开口、通风夹道等的巧妙设计,创造通风房间有效的开口压差动力,以便达到良好的自然通风效果。

邓巧林^[40]利用多区域网络法建立了具有中庭空间的某高层住宅建筑自然通风的稳态系统热力学模型,对热压作用、风压作用及二者共同作用下此住宅建筑自然通风特性进行了研究,模拟分析了不同的开口面积、位置以及横向气流对具有中庭空间的高层住宅建筑自然通风的影响。结果表明,热压作用时高层住宅建筑中庭及其周围区域自然通风效果夜晚好于白天;风压作用时则换气量主要由室外风速决定;两者共同作用时,热压能够提供稳定的换气量,风压作用时则带来较大的瞬时通风量。

竞峰等^[41]基于房间热平衡方法计算了我国部分城市办公建筑的自然通风潜力,得到这些城市自然通风有效性和相应的平均换气次数及标准偏差,并对自然通风潜力的各影响因素进行了分析。

刘加根等^[42]利用多区域网络法与DeST建筑热模型相结合,对建筑全年逐时自然通风进行了分析,以能耗为指标,定量分析自然通风的节能效果,提出相应的自然通风评价指标—自然通风全年节能率,并通过归纳总结板式办公建筑自然通风类型,提出了适用于建筑方案阶段快速判断自然通风节能潜力的“投资-收益区间判断法”,并以北京地区办公建筑为例,提出了不同通风动力类型建筑的建议区间,为建筑师在方案阶段快速设计自然通风提供了有力帮助。

李芄等^[43]用Esp-r对上海某一办公建筑标准层的自然通风进行了模拟,对过渡季节典型周内开窗和不开窗条件下的室内温度进行了比较,并统计了建筑全年不开窗和过渡季节开窗通风两种工况下的全年建筑冷、热负荷。结果表明过渡季节自然通风可以较好地满足室内温度及换气次数需求,并大大降低了全年空调运行时间和建筑能耗。

石卉等人^[44]以建筑热模型、多区域网络通风模型及多区域网络污染物模拟模型为主要分析工具,搭建了一个分析自然通风室内热环境、空气品质及能耗的综合平台,并以 CFD 技术模拟了平开式开口在不同开度下的流量系数的变化规律。最后将分析结果应用于北京某住宅建筑中,通过实例建筑的分析研究,得到不同门窗开度组合下的自然通风效果及对室内空气品质和能耗的影响情况。

(2) 混合通风的相关研究

闵剑青等人^[45]利用 CFD 技术对某内设污染源和集中热源的房间采用的两种混合通风方案的通风效果进行了模拟研究,分析了不同通风模式、不同送风速度对室内的温度和污染物浓度分布的影响,并通过对比温度效率和排污效率,得出具有较高舒适性和空气品质以及较高通风效率的通风模式。

沈艳等^[46]在夏季极端炎热的天气情况下对重庆某建筑的自然通风效果进行了分析研究,通过改变门窗的开启情况等因素测量和模拟室内几个典型房间的温度场和速度场情况,分析了自然通风在降低室内温度和改善人舒适性等方面的实际效果,并对混合通风工况进行了简要分析,为自然通风的优化设计提供了依据。

王松华^[47]定义了一个无因次参数来反映混合通风时机械通风和自然通风的相对强弱,通过模拟分析两开口和三开口的模型,得到当机械通风强度小时,室内空气气流以热压自然通风为主,室内温度较高其分层现象较明显,而随着机械通风强度的不断增强,温度场先处于一个过渡区,之后空气流动转化为机械通风为主,室内温度趋于均匀分布。作者还具体分析了送风口位置以及热源位置对室内温度场的影响情况。

王哲斌^[48]对教室采用的地下风道与太阳能集热屋面结合的机械辅助式自然通风进行了研究分析,模拟分析结果表明,夏季教室采用此种混合通风方式虽然在热舒适性上与采用普通分体空调进行空气调节相比没显示出绝对优势,但在满足基本热舒适要求的同时,其室内 CO₂ 浓度仅为采用普通分体空调时的 1/5,运行费用也仅为 1/6。

张荔^[49]针对南京地区的气象条件,提出了一种风机辅助式自然通风方式,并且设计了一种混合通风控制系统,根据室外气象参数对其进行控制。之后她搭建了一个实验台对该混合通风效果进行了实验研究,结果表明混合通风系统可以有效改善室内热舒适性,同时消耗较低能耗。

总的来说,目前国内外有关自然通风的研究基本上都是针对特定的建筑或模型进行的实验和(或)模拟研究,当建筑或模型不同时,需要重新搭建实验台或模型进行计算,这使得人们要花费很多时间进行这些基础计算。所以,本文旨在全面、系统化地分析自然通风的影响因素,以得到有关自然通风流量的通用结论,为快速、量化计算建筑自然通风换气量提供一种方法。同时,基于得到的结论,计算上海地区民用建筑利用自然通风的潜力。

1.3 研究目的与意义以及主要内容

1.3.1 研究目的与意义

本课题的目的在于研究自然通风在上海民用建筑中的应用潜力，定量化分析影响自然通风的各种因素，并从室内热舒适性和能耗两方面来综合考虑自然通风的效果。

本文的研究意义在于通过量化分析建筑表面风压系数和风口流量系数，从而定量计算建筑自然通风的通风换气量，得出上海地区办公建筑自然通风的利用潜力，为自然通风的优化设计提供指导，以便能在实际建筑加大自然通风系统的使用，改善目前建筑中全机械通风系统高能耗及室内空气品质不太理想的局面。

1.3.2 本课题主要研究内容

为了分析自然通风系统在上海民用建筑中的应用效果，论文首先重点分析了自然通风流量的几个影响因素，然后以一典型办公建筑为例，研究了上海地区民用建筑自然通风的利用潜力和节能潜力具体内容主要包括以下几个部分：

第一、分析建筑表面风压系数受建筑面积、建筑长宽比、高度、水平相对位置、室外风向以及周围建筑的影响情况，并用 SPSS 软件回归得到相应的公式。

第二、分析民用建筑常见的平开窗、推拉窗和悬窗三种窗户的以及内门的流量系数受窗户面积、高宽比、窗口开度以及窗口两侧温差的影响情况，并用 SPSS 软件回归得到相应的公式。

第三、根据上海典型年气象数据，统计分析上海不同季节的室外温度、湿度以及风速的分布规律。并结合上海某典型办公建筑模型，利用前两步的公式得出该建筑形式下的建筑表面风压、窗户流量系数以及内门流量系数。利用 C#编程计算得到建筑的自然通风空气流量。

第四、结合室内的热舒适温湿度范围，计算得到满足室内热舒适性要求时对应的室外气象参数，并根据上海典型年气象数据统计得到全年自然通风可用小时数。

第五、采用 EnergyPlus 软件对第三、四步中的那栋办公建筑采用自然通风和机械通风相结合的通风模式和全年机械通风模式两种情形下的全年能耗进行对比，分析利用自然通风后的节能潜力，综合评价上海地区民用建筑使用自然通风的潜力。

第2章 自然通风的基本原理

2.1 自然通风的机理

建筑的自然通风是利用风力造成的风压或（和）建筑内外空气密度差引起的热压来促使空气流动进行通风换气的。例如，如果建筑的外墙上某窗口两侧存在压差 ΔP ，就会有空气流过窗口，并满足：

$$\Delta P = \varepsilon \frac{v^2}{2} \rho \quad (2.1)$$

即

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\varepsilon \rho}} = \mu \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.2)$$

其中， ΔP 为窗口两侧的压力差，Pa； ε 为窗口的局部阻力系数； v 为空气流过窗口时的速度，m/s； ρ 为空气密度， kg/m^3 ； μ 为窗口的流量系数，其值与窗口的构造有关， $\mu = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}$ 。

通过窗口的空气流量为

$$Q = vA = \mu A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.3)$$

其中， Q 为空气流量， m^3/s ； A 为窗口的开口面积， m^2 ，其他的同前。

从式（2.3）可以看出，通过窗口的空气流量与窗口的面积、流量系数、窗口两侧的压差等有关。其中，流量随窗口的面积的增大而增大，而窗口的面积在设计时一般就会确定；流量系数的值与建筑窗口的构造有关，不同的窗口其值不一样；压差由建筑窗口两侧的热压和风压共同决定。因此，通过有效地利用和控制这些因素，可以更好地、更高效地利用自然通风。

从自然通风的作用原理上可以看出，其基本的作用形式有三种：热压、风压以及热压和风压的耦合作用。

2.1.1 自然通风的热压作用

热压作用是由于室内外空气温度不同，从而导致空气密度存在差异，进而在建筑开口处形成压差引起空气流动的。

首先分析单开口的情况，如图 2.1 所示，开口高度为 H ，宽度为 D ，面积为

$A=HD$, 流量系数为 μ 。假设室外空气温度为 T_0 , 密度为 ρ_0 , 室内的空气温度为 T_R , 密度为 ρ_R 。当室外空气温度 T_0 小于室内空气温度 T_R 时, 此时室外空气的密度大于室内空气的密度, 于是空气在室内外密度差($\rho_0 - \rho_R$)的作用下形成流动。室外冷空气从开口下方进入室内, 经室内热空气加热后上浮, 之后热空气从开口上方流出。

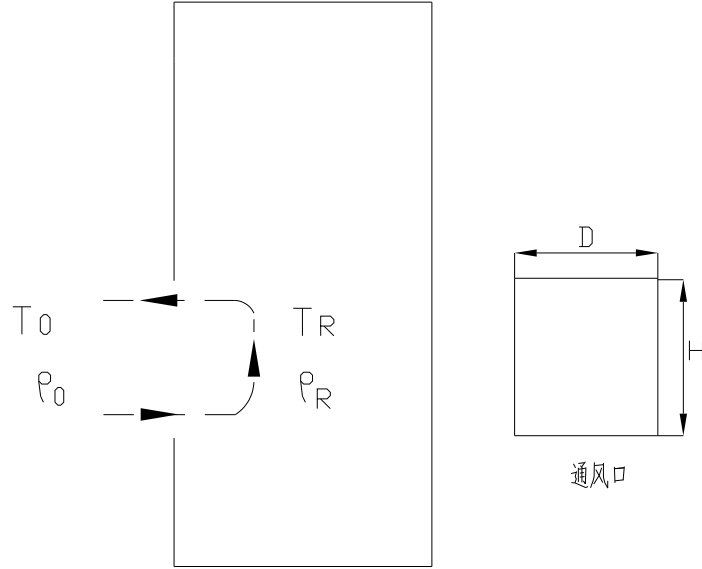


图 2.1 单开口热压通风

热压的计算公式为

$$\Delta P = gH(\rho_0 - \rho_R) \quad (2.4)$$

而空气膨胀系数 α 的定义为

$$\alpha = -\frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dT}{T}} \quad (2.5)$$

将式 (2.5) 代入式 (2.4), 于是得

$$\Delta P = \rho_0 g H \alpha (T_R - T_0) \quad (2.6)$$

开口处上下半部分的通风量大小相同, 方向相反, 可由下式计算得到:

$$\begin{aligned} Q &= \mu A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \\ &= \mu D \int_{y=0}^{y=H/2} \sqrt{\frac{2\Delta P(y)}{\rho}} dy \end{aligned} \quad (2.7)$$

将式 (2.6) 代入式 (2.7), 得

$$Q = \frac{1}{3} \mu A \sqrt{\frac{gH(T_R - T_0)}{T_0}} \quad (2.8)$$

双开口热压作用下的自然通风原理跟单开口下的一样，只不过是空气从一个开口流入室内，从另外一个开口流出室内。如图 2.2，开口面积分别为 A_1 和 A_2 ，流量系数均为 μ ，开口 1 和开口 2 的流量分别为 Q_1 和 Q_2 ，两开口中心的距离为 H 。同样假设室外空气温度为 T_0 ，密度为 ρ_0 ，室内的空气温度为 T_R ，密度为 ρ_R ，且室外空气温度 T_0 小于室内空气温度 T_R 。于是室外冷空气将会从下面的开口 2 进入室内，在室内受热升温后上浮，之后经开口 1 流出室外。

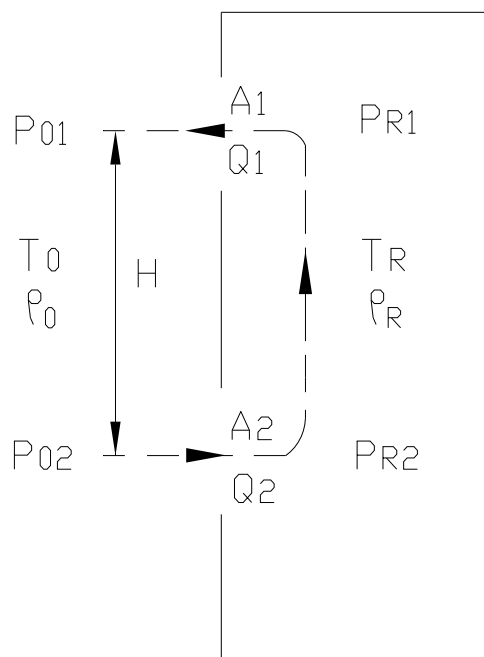


图 2.2 双开口热压通风

易知有：

$$P_{O2} = P_{O1} + \rho_0 g H \quad (2.9)$$

$$P_{R2} = P_{R1} + \bar{\rho}_R g H \quad (2.10)$$

将式 (2.9) 和式 (2.10) 相减得：

$$P_{O2} - P_{R2} = P_{O1} - P_{R1} + \rho_0 g H - \bar{\rho}_R g H \quad (2.11)$$

开口 1 处的空气流量为

$$\begin{aligned} Q_1 &= \mu A_1 \sqrt{\frac{2\Delta P_1}{\rho_1}} \\ &= \mu A_1 \sqrt{\frac{2(P_{R1} - P_{O1})}{\rho_1}} \end{aligned} \quad (2.12)$$

开口 2 处的空气流量为

$$Q_2 = \mu A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P_2}{\rho_2}}$$

$$= \mu A_2 \sqrt{\frac{2(P_{R2} - P_{O2})}{\rho_2}} \quad (2.13)$$

而根据空气质量守恒可知：

$$m = \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (2.14)$$

联立式 (2.11) ~ (2.14) 可得：

$$m = \frac{\mu \sqrt{2gH(\rho_0 - \bar{\rho}_R)}}{\sqrt{\frac{1}{\rho_{21}^2 A_1^2} + \frac{1}{\rho_2^2 A_2^2}}} \quad (2.15)$$

若令

$$\rho_0 - \bar{\rho}_R = \Delta\rho \quad (2.16)$$

$$\rho_1 \approx \rho_2 \approx \rho \quad (2.17)$$

则有

$$Q_1 = Q_2 = \mu \sqrt{\frac{2A_1^2 A_2^2}{A_1^2 + A_2^2} \frac{\Delta\rho}{\rho} gH} \quad (2.18)$$

其中，

P_{O1} —开口 1 处的室外压强，Pa；

ρ_1 —开口 1 处的空气密度， kg/m^3 ；

P_{R1} —开口 1 处的室内压强，Pa；

P_{O2} —开口 2 处的室外压强，Pa；

ρ_2 —开口 2 处的空气密度， kg/m^3 ；

P_{R2} —开口 2 处的室内压强，Pa；

$\bar{\rho}_R$ —室内空气的平均密度， kg/m^3 ；

$\Delta\rho$ —室内外空气的密度差， kg/m^3 ；

m —开口处的空气流量， kg/s 。

2.1.2 自然通风的风压作用

风压作用是指由于室外风的作用建筑物上产生了压力差并引起了空气流动。当室外气流吹过建筑物时，由于建筑物的阻挡作用，建筑物四周的空气流的压力分布发生变化。和未受干扰时的空气流相比，建筑物表面形成的静压变化称为风压。该建筑物表面的压力分布引起的室内空气流动即为风压作用下的自然通风。

在建筑物的迎风面上，由于空气流动受到阻挡，空气速度变小，使得风的部分动能转化为静压，于是在建筑物的迎风面上的压力将大于大气压力，形成了正

压区。而在建筑物的两侧、背风面及屋顶，在室外气流绕流建筑物的过程中形成了很多局部涡流，导致这些区域空气减少，于是形成负压区。自然风从正压区流向室内，再由室内流向负压区，这也就是风压作用下的自然通风流动过程，具体过程可见图 2.3。

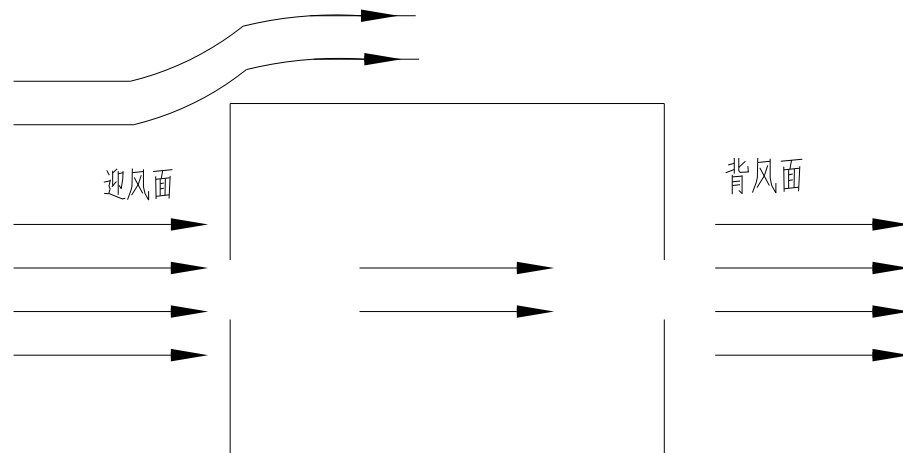


图 2.3 风压自然通风

风压的计算公式如下：

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} C_p v^2 \quad (2.19)$$

其中， ρ 为外界大气压下的空气密度， kg/m^3 ； C_p 为建筑表面的风压系数，可通过风洞实验或 CFD 模拟的方法得到； v 为某一参考高度处的风速， m/s 。

建筑室外的风速随离地面的高度的不同而变化，在计算风压时风速值应取某一参考高度（如 10m）下的风速值。根据风洞实验结果，室外风速随高度的变化规律可表示为如下关系式：

$$v = v_{10} \left(\frac{H}{10} \right)^\alpha \quad (2.20)$$

其中， v 为相应高度的风速， m/s ； v_{10} 为气象站测量时 10m 处的风速， m/s ； H 为任一点的高度， m ； α 为地面粗糙系数，该值与建筑所在的周围环境有关，一般海面处选取为 0.10，开阔郊区选取为 0.14，森林等处选取为 0.22，城市中心选取为 0.33。

风压作用下的通风量

$$Q = \mu A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.21)$$

其中， μ 为建筑开口的流量系数； A 为建筑开口的面积， m^2 。

建筑外表面风压的大小与室外风速大小和方向、建筑的几何形状、建筑周边环境状况、大气边界层等因素有关。因此，在利用风压自然通风时，首先该地区要有较好的外部风资源，只有该地区常年有较高风速的室外风才可以在建筑外表

面上形成持续的风压，引起室内外空气的相互流动。其次要合理的设计建筑，一般建筑朝向应为该地区的常年主导风向，同时合理的布置建筑外表面风口，尽量在建筑内部形成“贯流通风”。最后，合理的布置建筑群，建筑之间会有相互阻挡作用，因此在设计阶段应充分考虑这一点，使风压通风作用加强和改善。

2.1.3 自然通风的热压和风压的耦合作用

实际建筑的自然通风往往是在热压和风压的共同作用下形成的，因此建筑外围护结构上的压差应同时考虑热压和风压的作用。热压和风压的作用可能会相互加强，也有可能相互抵消，在设计时要特别考虑这一点。

对建筑的某一开口，当热压和风压的作用方向相同时，引起自然通风的动力压头等于热压和风压之和；而当二者方向不同时，动力压头等于热压和风压之差。

当二者耦合作用时，通风量并不是二者单独作用时产生的空气流量的简单代数和。假设 Q_H 为热压作用下的通风量， Q_W 为风压作用下的通风量，建筑开口的阻力为 S ，则自然通风的总压头为

$$\Delta P = P_H + P_W = S(Q_H^2 + Q_W^2) = SQ^2 \quad (2.22)$$

于是总流量为

$$Q^2 = Q_H^2 + Q_W^2 \quad (2.23)$$

2.2 自然通风的研究方法

自然通风的研究方法主要有理论分析法、实验分析法以及数值分析法三种：

1、理论分析法

利用流体力学中的伯努利方程、能量守恒方程以及热压、风压的作用式来分析自然通风，得到室内的温度、速度等的分布。此种方法是从流体力学和热力学的基础理论出发，分析自然通风的相关问题。由于建筑的复杂性等原因，此方法有其局限性。

2、实验法

实验法是根据所需的工况自己搭建试验台进行分析研究，可以很直观地看到各种实验工况下的结果。常用的实验方法有以下几种：

(1) 风洞实验法

风洞实验的原理是相似性原理，它主要是用于模拟建筑表面及周围的压力场和速度场，以及确定建筑表面风压系数，预测自然通风的性能。

(2) 示踪气体测量法

示踪气体测量法可用来预测建筑通风量和室内气流分布，它分为定浓度法和

衰减法两种。定浓度法是指在测试期间保持测试房间的示踪气体的浓度不变, 改变示踪气体注射量, 它可以用来处理驱动力改变的通风问题, 如自然通风和房间渗透问题。衰减法是指向测量房间注入一定量的示踪气体, 随着气体在各个房间内扩散, 示踪气体的浓度会逐渐衰减, 它可以用来预测自然通风量。

(3) 热浮力实验模型技术

用热浮力实验模型技术模拟热压驱动的自然通风的物理过程比较直观。目前主要有4种技术: 带有加热装置的气体模拟法(以空气或其他气体作为流动介质, 热浮力由固定的加热装置产生); 带有加热装置的水模型系统(以水作为介质, 有固定的加热装置); 盐水模拟法(利用盐水的浓度差产生类似于热羽的流动, 已被广泛接受, 但需大蓄水池和不断补充盐水); 气泡技术(由电路的阴极产生气泡以模拟热羽运动, 可以模拟点源、线源及垂直热源的情况)。该方法有个缺陷就是不能模拟建筑热惰性对自然通风的影响情况。

(4) PIV实验方法

PIV技术是由固体力学散斑法发展而来的, 其原理是在流场中放置示踪粒子, 用脉冲激光片光源照射所要研究的流场区域, 通过连续地多次曝光, 粒子图像被记录在底片上, 再用光学杨氏条纹法, 自相关或相关逐点处理就可得到流场的分布。而同时随着PIV技术的发展, 出现了Micro-PIV技术, 与传统PIV相比, Micro-PIV装置具有以下特点: 通过显微光学系统拍摄微观尺寸的流场图像; 光源采用全场照射方式; 亚微米至纳米级荧光示踪粒子和纳米级示踪粒子布朗运动现象明显。

实验法可以运用到任何研究中, 但有时考虑实验成本以及实验进度等原因, 该方法并不是最佳选择。

3、数值分析法

数值模拟方法具有成本低、速度快、能方便模拟各种工况和结果可视化等优点, 因此它的应用越来越广泛。它主要分为以下三种:

(1) 网络法(Network models)

网络法是从宏观的角度分析自然通风, 它将建筑看成由许多区组成, 各区通过通风网络路径(如窗户、门等)与其他区相连, 形成网络。若建筑内部开口较大, 则可将此相连的两部分看成一个单区。该方法计算所需的输入数据包括: 室外风速大小和风向、室外温度等气象参数; 通风口个数、大小和位置等数据; 划分的区域个数、大小等。网络法的优点是计算简单, 它可用于计算建筑设计初级阶段的自然通风量, 但不能得出各房间内的温度、浓度等参数分布与气流分布情况。目前国内外使用的网络模型主要有: AIDA 单区模型、AIOLOS 多区模型、LBL 模型、AIRNET 模型、MIX 模型、CONTAM 模型以及 COMIS 多区模型等

等。

(2) 区域模型方法(Zonal models)

该方法是将整个房间划分成若干个小的区域,并认为每个区域内的相关参数一致,即各点的温度、浓度等参数都相同,每个区域之间存在着热质交换。通过建立质量和能量守恒方程,并考虑压差和流动的关系来分析研究房间内的温度、浓度分布及气体流动情况。它与网络法的主要区别在于热烟羽、射流、热层等理论的运用。因此该方法比网络法要复杂些,并且计算结果更精确,但它比 CFD 方法要简单些。区域模型法可嵌套在多区建筑能耗和气流分析软件中用来预测建筑室内温度和气流分布。

(3) CFD 方法

CFD 方法(Computational Fluid Dynamics, 计算流体力学)是目前应用和广泛和较成熟的一种方法,它可以用来模拟仿真实际流体的流动情况,并分析得到房间内不同点的温度场、浓度场和气流流体情况等。它的原理是将房间划分为大量小的控制体,即将原本在时间和空间上连续的物理量,用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替,并通过质量守恒、能量守恒和动量守恒等方法建立起这些点间的相互联系。也即将各物理量原本连续的微分方程通过有限差分或有限元方法离散成非连续的代数方程组,这样就只要结合边界条件即可求解代数方程组。当划分的控制体足够小和足够多时,我们就可认为得到的各离散点的值即准确的代表了房间内各点的参数值。因此,CFD 方法可用来详细描述流场分布情况。CFD 方法的一个缺陷是由于求解问题往往较复杂,很多问题都是是非线性的,所以所需划分的网格较多,因而耗时较长,对计算机的配置要求也较高。

目前常用的 CFD 商业软件有很多,如 Fluent, Pheonics 等。它们的功能比较全面,可求解工程中的各类复杂问题。

本文将利用 Fluent 软件来分析研究自然通风。Fluent 软件是目前应用非常广泛的一款 CFD 软件,采用了多种求解方法和多重网格加速收敛技术,因此 Fluent 能达到最佳的收敛速度和求解精度。同时,灵活的非结构化网格和基于解的自适应网格技术及成熟的物理模型(包括无粘流、层流以及湍流等),使 Fluent 在湍流、传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、动/变形网格、噪声、材料加工、燃料电池等方面有广泛应用。Fluent 目前也广泛运用到暖通空调领域,它能较准确地模拟建筑风场、室内气流分布、室内温度场和室内速度场等,是分析建筑通风气流的一个常用工具。

第3章 自然通风影响因素分析研究

建筑窗口处自然通风空气流量的计算公式如式 (3.1)，从式中可以看出， Q 与窗口面积 A 、窗口流量系数 μ 和窗口两侧的压差 ΔP 有关。由于窗口面积一般是按照规范确定的，下面主要分析窗口处两侧的压差和流量系数的情况，并且将它们定量化，以便进行自然通风换气量的计算。

$$Q = vA = \mu A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3.1)$$

3.1 建筑表面风压系数的影响因素分析

当室外来流风吹向建筑时，由于建筑的阻挡作用，部分动压转化成了静压，于是建筑表面会有较大压力。一般情况下我们可以用风压系数来表征建筑风压的大小，其值为：

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho v_{\text{基准}}^2} \quad (3.2)$$

其中， C_p 为风压系数， P 为建筑表面的压力， $v_{\text{基准}}$ 为某基准高度的风速，现在普遍是取建筑顶部处的风速值。但由于当建筑高度改变时，分析得到的风压值就不能直接进行比较，为此，本文将统一以 10m 高度处的动压作为计算风压系数的基准值。

建筑表面风压系数主要受来流风向 θ 、建筑平面长宽比 L （来流的那边与相邻那边的比值，即 $L=R/D$ ）、建筑面积 A （ $A=R \times D$ ）、建筑垂直方向高度 h 、建筑水平相对位置 n （ $n=X/R$ ）以及周围建筑环境等值的影响，见图 3.1。下面分析各因素对建筑表面风压系数的影响情况。

3.1.1 研究方法及模型参数

本文将采取 Fluent 软件模拟计算建筑表面风压系数，将待研究的建筑置于一个大空间流场中，给定一定的风速吹向建筑，即可计算得到建筑表面的风压系数。

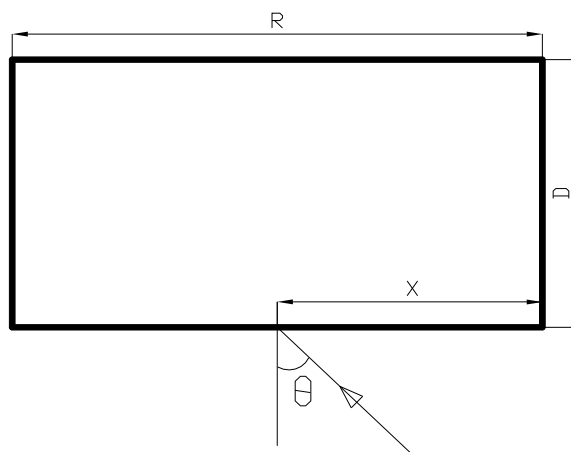


图 3.1 建筑模型示意图

3.1.1.1 模型及计算区域

计算模型见图 3.2。该计算区域大小的选取是根据建筑尺寸确定的，长和宽方向各为房间长宽相应大小的 10 倍，高度为建筑高度的 5 倍。且建筑距计算区域两侧的长度均为 5 倍房间宽度，距上游边界区域为 4 倍房间长度大小，距下游边界区域为 6 倍房间长度大小。

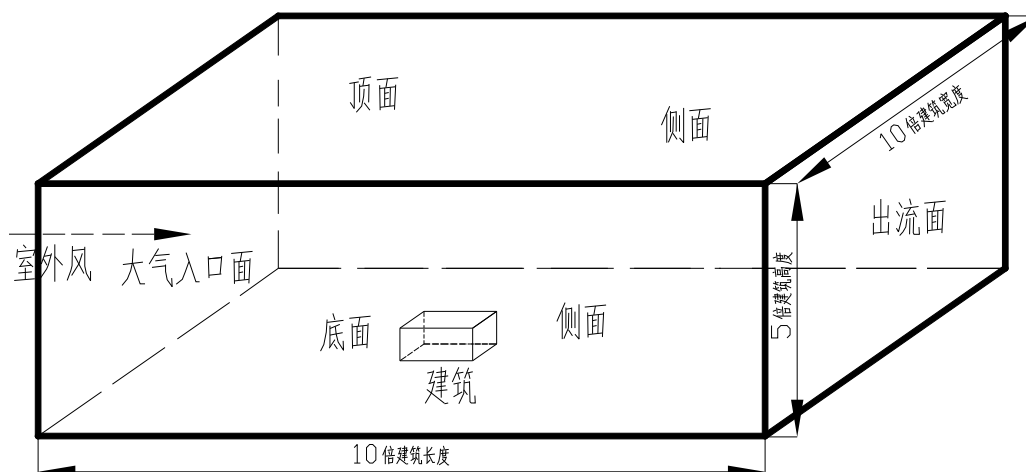


图 3.2 建筑表面风压模拟模型示意图

3.1.1.2 湍流模型

自从雷诺在 1895 年提出时间平均的 N-S 方程以来，学者和研究人员已经提出很多种湍流模型，CFD 湍流模型主要有以下六种：

1、零方程模型

该方程基于普朗特混合长度理论，它是用代数关系式，把湍动粘度与时均值联系起来的模型。该模型中只用湍流的时均连续方程和雷诺方程组成方程组，把方程组中的雷诺应力用平均速度场的局部速度梯度来表示。

该湍流模型的优点是直观简单,对于如射流、混合层、扰动和边界层等带有薄的剪切层的流动比较有效。但在复杂流动中由于难以确定混合长度,而且不能用于模拟带有分离及回流的流动,因此,该模型在实际工程中很少应用。

2、一方程模型

该模型是在零方程模型的基础上增加了一个湍动能的输运方程,从而考虑了对流输运和扩散输运,因此它比零方程模型更加合理。但一方程模型中湍流脉动的长度比尺仍不好确定,因而模型也难以得到推广应用。

3、标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型

该模型是在一方程模型的基础上增加了一个关于湍流耗散率的方程,这使得该模型更加准确,该模型在科学研究及工程实际中得到了广泛的检验和成功的应用。

但该方程模型也有其局限性,例如由于该模型的建立是基于湍流发展非常充分的湍流流动来建立的,是一种针对高雷诺数的湍流计算模型,当雷诺数比较低时,在近壁区的流动可能处于层流或湍流流动不充分,湍流的脉动影响可能不如分子粘性的影响大,于是直接采用标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型进行计算会导致结果出现较大偏差。还有,该模型在弯曲壁面流动和强旋流等场合计算也同样会产生一定的失真。

4、RNG $k-\varepsilon$ 两方程模型

该方程模型是对标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型进行了修正,主要有:在动量方程、能量方程、 k 方程与 ε 方程中均考虑了分子粘性作用;考虑了因素流强度衰减引起的低 Re 数的影响等。

5、雷诺应力方程模型 (RSM)

该模型放弃等方性边界速度假设,RSM使得雷诺平均N-S方程封闭,解决了关于方程中的雷诺压力,还有耗散速率。这意味这在二维流动中加入了四个方程,而在三维流动中加入了七个方程。因此该模型的计算量大,对计算机要求高。因此该模型不如 $k-\varepsilon$ 模型应用广泛。由于RSM比单方程和双方程模型更加严格的考虑了流线型弯曲、漩涡、旋转和张力的快速变化,它对于复杂流动有更高的精度预测的潜力。但对于一般的回流流动,RSM的结果并不一定比 $k-\varepsilon$ 模型好。

6、代数应力模型 (ASM)

ASM是将各向异性的湍动粘度的影响合并到雷诺应力中进行计算的一种经济算法,但它要比 $k-\varepsilon$ 模型多解六个方程,其计算工作量远大于 $k-\varepsilon$ 模型,因此该模型也没有 $k-\varepsilon$ 模型应用广泛。但对于流动特性是由雷诺正应力的各向异性造成的流动,例如方形管道和三角形管道内的扭曲和二次流的模拟,若使用 $k-\varepsilon$ 模型得不到理想的结果,而使用ASM就非常有效。

本文将采用RNG k-ε两方程模型进行自然通风流场模拟。

3.1.1.3 边界条件

模型各边界条件的设定如下：

1、大气入口面

该面的边界条件表示建筑外风场的来流情况，设为速度入口边界条件。由于风压系数是一个无量纲数，与速度的绝对值并没有关系，于是本文中假设来流风满足 $v_{10} = 3\text{m/s}$ ，且讨论建筑处于市中心的情况，于是风速随高度的变化规律可表示为

$$v = v_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^{0.33} \quad (3.3)$$

其中， v_{10} 表示气象台高度 10m 处的风速，m/s； h 表示高度，m。

2、侧面

该面与外界分析平行，在本模型中设置为对称边界，即在边界处速度梯度为 0。

3、出流面

该面与大气入口面相对，在本模型中设为自由出口边界。

4、底面和顶面

为简化计算，本模型中均设为无滑移墙面。

3.1.2 各因素对风压系数影响分析

论文主要分析建筑面积、建筑平面长宽比、室外来流风向、建筑不同高度以及水平相对位置对风压系数的影响情况，由于各因素对风压系数存在相互影响的情况，为准确的分析出各因素对风压系数的综合影响特性，本文将对五个因素进行组合模拟计算，当每个因素取 5 个水平值时，进行排列组合可知一共要进行 3125 次模拟计算，显然这个工作量是相当大的，特别是如果影响因素更多，要进行的模拟次数将是巨大的。为此，本文中将采用“正交实验法”进行模拟计算处理。正交实验法是根据正交表确定进行的模拟工况，由于正交表是利用“均衡分散性”和“整齐可比性”这两条正交性原理，从大量的试验点中挑选适量的具有代表性、典型性的试验点，按照有规律的顺序排列成现成的表格，所以虽然没有对所有工况都进行模拟计算，但结果仍具有代表性和准确性。

本文讨论的风压系数影响因素有 5 个，每个均为 5 水平，如表 3.1 所示。故可以采用 6 因素 5 水平正交表 L25(5^6)来分析，一个进行 25 次试验，L25(5^6)正交表的部分举例见表 3.2 所示。部分正交实验安排及结果见表 3.3 所示。

下面对数据进行多元线性逐步回归分析,以便得到建筑面积、建筑平面长宽比、室外来流风向、建筑不同高度以及水平相对位置等因素对风压系数的影响规律。

表 3.1 各因素的水平划分表

水平	建筑面积	平面长宽比	风向角度	高度	水平相对位置 m
	A	L	Θ	h	
	m ²	1	°	m	1
1	100	0.25	0	0.37	0
2	200	0.5	45	1.48	0.25
3	400	1	90	10	0.5
4	900	2	135	23.7	0.75
5	1600	4	180	46.3	1

表 3.2 L25(5⁶)正交表部分举例

	A	L	Θ	h	m	空列
6	2	1	2	3	4	
7	2	2	3	4	5	
8	2	3	4	5	1	
9	2	4	5	1	2	

表 3.3 L25(5⁶) 部分正交实验安排及结果

	A	L	Θ	h	m	空列	C _p
6	200	0.25	45	10	0.75		0.449
7	200	0.5	90	23.7	1		-0.646
8	200	1	135	46.3	0		-2.104
9	200	2	180	0.37	0.25		-0.037

3.1.2.1 多元线性回归分析

多元回归分析是指通过对两个或两个以上的自变量与一个因变量的相关分析,建立预测模型进行预测的方法。当自变量与因变量之间存在线性关系时,称为多元线性回归分析。多元线性经验回归方程的一般形式为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3.4)$$

其中, $k \geq 2$, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 是 $k+1$ 个未知数, β_0 称为回归常数, β_1, \dots, β_k 称为回归系数, ε 为随机误差。

在多元回归方程中，每个回归系数 β_k 表示在回归方程中，其他自变量保持不变的情况下， x_k 每增加一个单位时因变量 y 的平均增加程度，因此也把多元回归的回归系数称为偏回归系数。

多元线性回归方程中，各自变量的单位不同，其偏回归系数之间是无法直接比较的。需要对偏回归系数标准化，以消除量纲的影响，因此提出标准化回归系数（Standardized Coefficients）：

$$x_j^* = \frac{x_j - \bar{x}_j}{s_j}, y_i^* = \frac{y_i - \bar{y}}{s_i}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p \quad (3.5)$$

经过变换，得到了标准化的样本数据的经验回归方程：

$$y^* = \beta_1^* x_1^* + \beta_2^* x_2^* + \dots + \beta_k^* x_k^* \quad (3.6)$$

标准化回归系数与一般偏回归系数之间的关系为：

$$\beta_j^* = \frac{\sqrt{L_{jj}}}{\sqrt{L_{yy}}} \beta_j \quad (3.7)$$

由于标准化后的所有变量均数为 0，标准差为 1，因此标准化回归系数表示，当其他自变量保持不变时，自变量 x_j 的 1% 相对变化（相对于 $\sqrt{L_{jj}}$ ）引起的因变量均值的相对变化百分数（相对于 $\sqrt{L_{yy}}$ ）。该值绝对值的大小，可用以衡量自变量对因变量贡献的大小，即说明各自变量在多元回归方程中的相对重要程度。

同样地，求出多元线性回归方程后，也需对其进行显著性检验：

（一）回归方程的显著性检验

多元线性回归方程的显著性检验是看自变量 x_0, x_1, \dots, x_k 从整体上对 y 是否有明显影响，一般采用 F 检验，利用方差分析方法进行。F 统计量定义为：平均的回归平方和与平均的残差平方和之比，对于多元线性回归方程，有：

$$F = \frac{SSR/k}{SSE/(n-k-1)} \quad (3.8)$$

SSR 为回归平方和，SSE 为残差平方和， n 为样本数， k 为自变量的个数。

假设 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ ，在正态假设下，当原假设成立时， F 服从自由度为 $(k, n-k-1)$ 的 F 分布。当 $F > F_\alpha(k, n-k-1)$ 时，拒绝 H_0 ，认为在显著性水平 α 下， y 对 x_1, x_2, \dots, x_k 有显著的线性关系，也即回归方程显著；反之，当 $F < F_\alpha(k, n-k-1)$ 时，认为回归方程不显著。

（二）回归系数检验

在多元线性回归中，回归方程显著并不意味着每个自变量对 y 的影响都显著，如果某些变量对 y 的影响较小，可有可无，则可通过回归系数的显著检验将其剔除。检验某个变量 x_j 是否显著，即检验假设 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ ，需要采

用 t 检验。构造 t 统计量:

$$t = \frac{\beta_j}{S_{\beta_j}} \quad (3.9)$$

当原假设 H_0 成立时, t 统计量服从自由度为 $n-k-1$ 的 t 分布。给定显著性水平 α , 双侧检验的临界值为 $t_{\alpha/2}$ 。当 $|t_j| > t_{\alpha/2}$ 时拒绝原假设, 认为 β_j 不显著为零, 自变量 x_j 对 y 的线性效果显著; 当 $|t_j| < t_{\alpha/2}$ 时, 接受原假设, 认为 $|t_j| > t_{\alpha/2}$ 为零, 二者的线性效果不显著。

本文采用 SPSS 软件对计算结果进行多元回归分析, 以得到风压系数与建筑面积、室外风向、建筑长宽比、建筑高度和建筑水平相对位置的关系式。

SPSS(Statistical Package for Social Science), 即“社会科学统计软件包”, 随着 SPSS 产品服务领域的扩大和服务深度的增加 2000 年 SPSS 公司正式将英文全称更改为 Statistical Product and Service Solutions, 意为“统计产品与服务解决方案”, 它是世界上最早的统计分析软件, 由美国斯坦福大学的三位研究生于 20 世纪 60 年代末研制出来。SPSS 可以应用于通讯、医疗、银行、证券、保险、制造、商业、市场研究、科研教育等多个领域和行业。它集数据管理、统计分析、趋势分析及绘制图表于一身, 可以进行相关分析、回归分析、因子分析、聚类分析及非参数验证等多种统计分析。

3.1.2.2 风压系数多元回归结果

1、回归结果:

采用逐步回归法对数据进行处理分析, 结果见表 3.4~表 3.6。

表 3.4 风压系数多元回归总结

复数相关系数	决定系数	校正的决定系数	标准差
0.952	0.906	0.887	0.29615

表 3.5 风压系数多元回归方差分析表

	平方和	自由度	均方根	F 值	显著性 sig
回归分析	16.816	4	4.204	47.933	0.000
剩余值	1.754	20	0.088		
总和	18.570	24			

表 3.6 风压系数多元回归系数表

	未标准化系数 B 值	估计标准差	标准化系数 β	t 检验	显著性 sig
常数	-0.014	0.076		-0.186	0.854
X ₁₅	0.039	0.004	0.839	9.782	0.000
X ₁₁	-0.028	0.005	-0.421	-5.898	0.000
X ₁₃	0.070	0.047	0.130	1.500	0.05
X ₂₀	0.006	0.002	0.278	3.732	0.01

1) 自变量: $x_1=\sin\theta$, $x_2=\cos\theta$, $x_3=n$, $x_4=L$, $x_5=A$, $x_6=h$, $x_7=\sin\theta\cos\theta$, $x_8=n\sin\theta$, $x_9=L\sin\theta$, $x_{10}=A\sin\theta$, $x_{11}=h\sin\theta$, $x_{12}=n\cos\theta$, $x_{13}=L\cos\theta$, $x_{14}=A\cos\theta$, $x_{15}=h\cos\theta$, $x_{16}=nL$, $x_{17}=nA$, $x_{18}=nh$, $x_{19}=LA$, $x_{20}=Lh$, $x_{21}=Ah$ 。

2) 因变量: C_p

经过逐步回归后, 剔除了自变量 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{12}, x_{14}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, x_{21}$, 从而使最后的回归子集为最优回归子集。回归方程为:

$$C_p = 0.039h\cos\theta - 0.028h\sin\theta + 0.07L\cos\theta + 0.006Lh - 0.014 \quad (3.10)$$

2、回归诊断:

(1) 见表 3.4, 复相关系数为 0.952, 决定系数为 0.906, 由决定系数看回归方程显著。

(2) 见表 3.5, 方差分析表, F 值为 47.933, 显著性 sig 约为 0.000, 表明回归方程高度显著, 说明 $x_{11}, x_{13}, x_{15}, x_{20}$ 整体上对 C_p 有高度显著的线性影响。

(3) 回归系数的显著性检验。由表 3.6 看出自变量 $x_{11}, x_{13}, x_{15}, x_{20}$ 的显著性 sig 均小于 0.05, 即这些自变量对 C_p 均有显著影响。

3.1.2.3 影响因素分析

从式(3.10)可以看出, 通过逐步回归, 建筑平面长宽比、室外来流风向以及建筑高度对风压系数的影响更加显著, 而建筑平面面积和水平相对位置由于影响没有前三个因素大, 在逐步回归中被剔除了。

首先, 对于建筑平面长宽比, 当室外来流风向 θ 以及建筑高度一定时, 风压系数将随着平面长宽比成线性增长规律, 但室外来流风向 θ 以及建筑高度取不同的组合值时, 线性增幅并不同。例如当 $\theta=0^\circ$ 、 $h=1m$ 以及 $\theta=90^\circ$ 、 $h=5m$ 两种情况下, 风压系数和建筑平面长宽比的变化关系如图 3.3 所示。

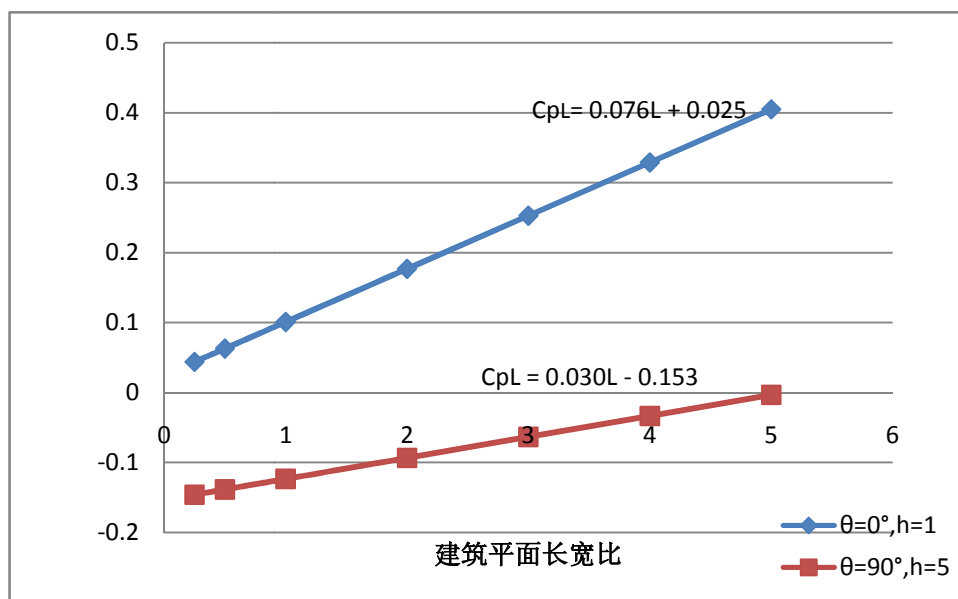


图 3.3 风压系数随建筑平面长宽比的变化规律

其次，对于室外来流风向，当建筑平面长宽比和建筑高度确定时，建筑表面风压系数随其呈正、余弦规律变化，值会先减小后又变大。同样，当建筑平面长宽比和建筑高度取不同的组合值时，变化的规律会存在差异。当 $L=1$, $h=1\text{m}$ 和 $L=2$, $h=5\text{m}$ 时，风压系数与室外来流风向的变化规律如图 3.4 所示。

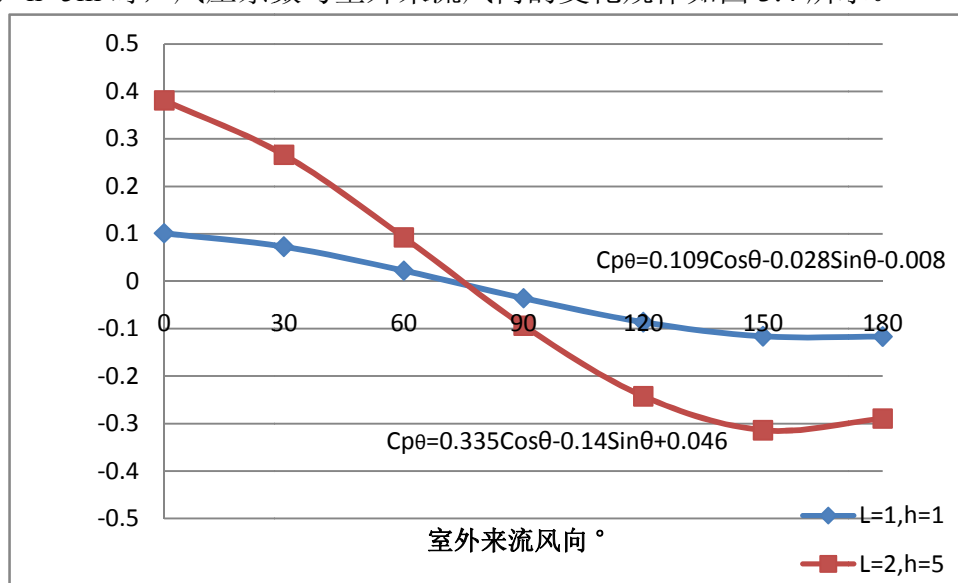


图 3.4 风压系数随建筑平面长宽比的变化规律

最后，对于建筑高度，当建筑平面长宽比和室外来流风向一定时，风压系数随其呈线性变化规律。同样，当建筑平面长宽比和室外来流风向取不同的组合值时，线性增幅会存在差异。当 $L=1$, $\theta=0^\circ$ 和 $L=2$, $\theta=90^\circ$ 时，风压系数与室外来流风向的变化规律如图 3.5 所示。

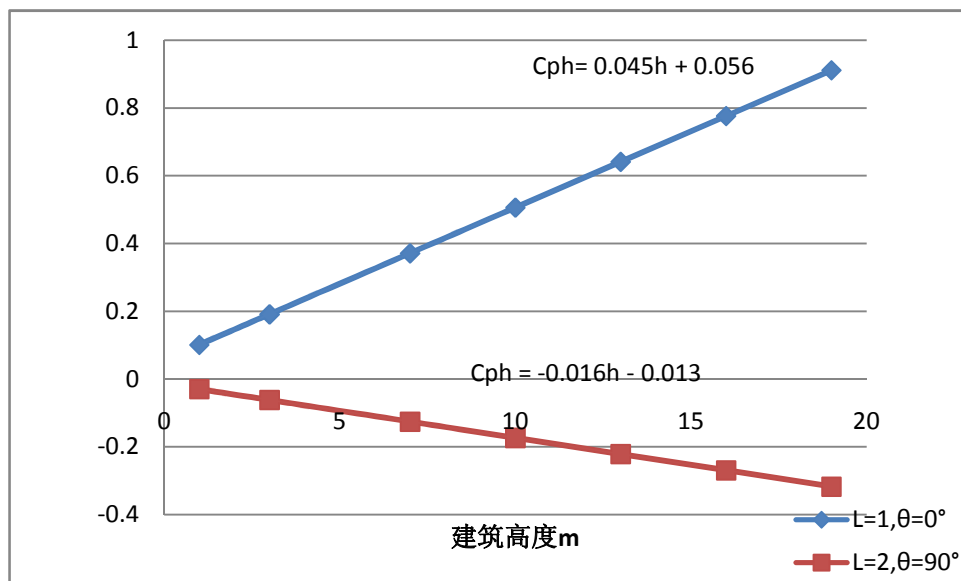


图 3.5 风压系数随建筑高度的变化规律

3.1.3 周围建筑的影响分析

前面分析的是单体建筑的风压系数，并未考虑周围建筑的影响。实际上，由于周围建筑的阻挡作用，风速大小和方向均会发生改变，从而在建筑表面产生的风压大小会有改变。本节将分析某单体建筑周围有一相同的建筑时其表面风压变化情况，对前面计算得到的风压系数进行修正。

如图 3.6，建筑风向角度为 θ ，两建筑中心距离为 R ，风向与建筑中心连线的夹角为 α 。定义 $m=R/D$ 。下面讨论 θ 、 α 、 m 以及高度 h 取不同值时风压系数的变化值，即求出一个修正系数 ΔC ，也即有：

$$C_p = \Delta C + C_{p_{\text{单}}} \quad (3.11)$$

其中， C_p 为周围有一相同建筑时的建筑表面风压系数， $C_{p_{\text{单}}}$ 为单体建筑时的风压系数，可由式（3.15）计算得到。

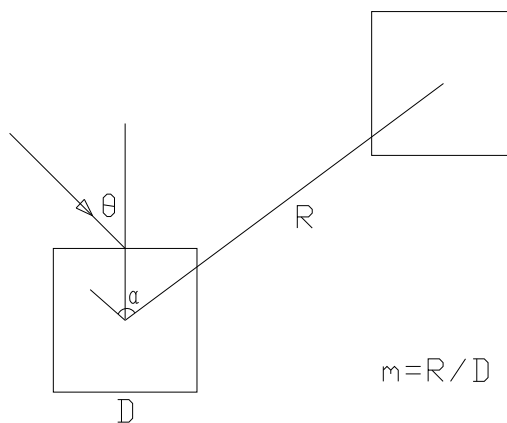


图 3.6 建筑相对位置示意图

由于一共有四个因素，当每个因素按表 3.7 所示取 4 个水平值时，可以采用五因素四水平 $L_{16}(4^5)$ 正交表进行设计计算。 $L_{16}(4^5)$ 正交表的部分举例见表 3.8 所示。计算得到的部分正交实验安排及结果见表 3.9 所示。

表 3.7 各因素的水平划分表

水平	风向角度为 θ	风向与建筑中心连线夹角 α	m	高度 h 处
1	0	0	1.5	0.37
2	45	30	2	1.48
3	90	45	2.5	10
4	135	60	3	23.7

表 3.8 $L_{16}(4^5)$ 正交表部分举例

	θ	α	m	h	空列
5	2	1	2	3	
6	2	2	1	4	
7	2	3	4	1	
8	2	4	3	2	

表 3.9 $L_{16}(4^5)$ 部分正交实验安排及结果

	θ	α	m	h	空列	ΔC
5	45	0	2	10		-1.815
6	45	30	1.5	23.7		-2.226
7	45	45	3	0.37		-0.007
8	45	60	2.5	1.48		-0.002

1、回归结果

利用 SPSS 软件计算逐步多元回归计算分析，结果见表 3.10~表 3.12。

表 3.10 风压系数修正量多元回归总结

复数相关系数	决定系数	校正的决定系数	标准差
0.853	0.728	0.720	0.237

表 3.11 风压系数修正量多元回归方差分析表

	平方和	自由度	均方根	F 值	显著性 sig
回归分析	3.719	3	1.240	5.229	0.015
剩余值	2.845	12	0.237		
总和	6.564	15			

表 3.12 风压系数修正量多元回归系数表

	未标准化系数 B 值	估计标准差	标准化系数 β	t 检验	显著性 sig
常数	-0.962	0.224		-2.968	0.012
X ₁₅	0.108	0.048	0.426	2.239	0.045
X ₁₆	-0.210	0.075	-0.532	-2.799	0.016
X ₁₄	2.46E-6	0.000	0.320	1.685	0.048

1) 自变量: $x_1=\theta$, $x_2=\alpha$, $x_3=m$, $x_4=h$, $x_5=\theta\alpha$, $x_6=\theta m$, $x_7=\theta h$, $x_8=\alpha m$, $x_9=\alpha h$, $x_{10}=mh$, $x_{11}=\theta^2$, $x_{12}=\theta^3$, $x_{13}=\alpha^2$, $x_{14}=\alpha^3$, $x_{15}=m^2$, $x_{16}=\ln(h)$ 。

2) 因变量: ΔC

经过逐步回归后, 剔除了自变量 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}$, 从而使最后的回归子集为最优回归子集。回归方程为:

$$\Delta C = 0.108m^2 - 0.21 \ln(h) + 2.461 \times 10^{-6}\alpha^3 - 0.962 \quad (3.12)$$

2、回归诊断:

(1) 见表 3.10, 复相关系数为 0.853, 决定系数为 0.728, 由决定系数看回归方程显著。

(2) 见表 3.11, 方差分析表, F 值为 5.229, 显著性 sig 约为 0.015, 表明回归方程高度显著, 说明 x_{11}, x_{12}, x_{13} 整体上对 ΔC 有高度显著的线性影响。

(3) 回归系数的显著性检验。由表 3.6 看出自变量 x_{11}, x_{12}, x_{13} 的显著性 sig 均小于 0.05, 即这些自变量对 ΔC 均有显著影响。

3.2 建筑外窗流量系数的影响因素分析

建筑外窗不仅可以使室外阳光直接照入室内, 同时它还是室内环境与外界环境进行热质交换的一个重要载体, 可以作为建筑自然通风的天然的通风口。窗户

的流量系数是反映窗口处空气流量一个重要参数，流量系数的计算公式如下：

$$\mu = \frac{Q}{A} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P}} \quad (3.13)$$

其中 A 取窗口的最大可开启面积。

本文中主要讨论建筑中常见的平开窗、推拉窗以及悬窗三种窗户形式的流量系数，分析它们受窗口面积 A、窗口高宽比 L、窗户开度 θ 以及室内外温差 Δt 的影响情况。

3.2.1 研究方法及模型参数

本处采用的方法同样是 Fluent 模拟计算分析，通过建立不同窗户的模型，模拟得到相应参数工况下的流量系数，之后分析数据，得到各因素对窗户流量系数的影响情况。

物理模型见图 3.7，即将一个按实际模型建立的窗户置于一定的气流下，测量通过窗口处的空气流量，再根据窗口两侧的压差即可计算得到流量系数。

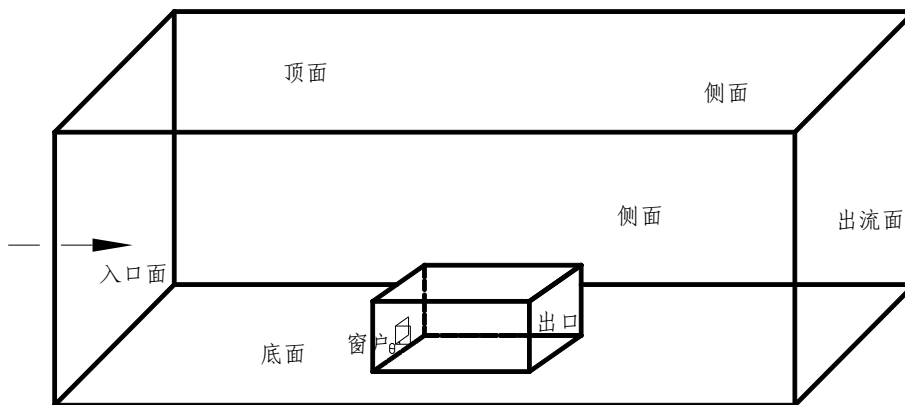


图 3.7 建筑外窗流量系数模拟模型图

湍流模型采用 RNG k- ϵ 两方程湍流模型。

边界条件：

(1) 入口面

设为速度出口，给定一个速度值，用于确定通过窗口处的空气流量。

(2) 出口面

设为自由出口，空气从出口面流出。

(3) 侧面

两个侧面均设为对称边界，即在边界处速度梯度为 0。

(4) 顶面和底面

均设为无滑移墙面。

(5) 窗口

按照实际模型建立，设为自由出口，根据其两侧的压差作用有空气流进出。

3.2.2 平开窗流量系数影响因素分析

平开窗是目前应用较广泛的一直窗户形式，它是用铰链把窗扇与窗框相连，窗扇可以旋转开启。如图 3.8 所示，窗口面积为 $A=RD$ ，窗户高宽比为 $L=D/R$ ，窗口开度为 θ 。

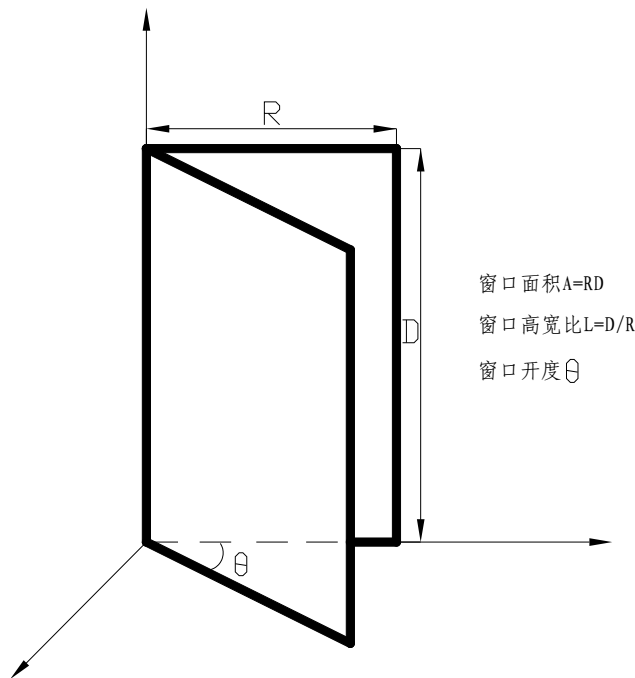


图 3.8 平开窗示意图

3.2.2.1 多元线性回归分析

窗口面积、窗口高宽比、窗口开度以及室内外温差对窗户流量系数均有影响，为综合考虑以上四个因素的影响，同理采用正交实验进行分析，本文中每个参数均取 5 个不同的值，于是可以采用 6 因素 5 水平正交表 $L_{25}(5^6)$ 来分析，一个进行了 25 次试验。各因素的水平划分表见表 3.13。 $L_{25}(5^6)$ 正交表的部分举例见表 3.14 所示。计算得到的部分正交实验安排及结果见表 3.15 所示。

对正交实验的数据进行处理，利用 SPSS 软件进行多元逐步回归，以便得到窗户流量系数与各影响因素的关系。

表 3.13 各因素的水平划分表

水平	窗口面积 A	高宽比 L	窗户开度 θ	室外内温差 Δt
	m^2		$^\circ$	$^\circ C$
1	0.5	1	5	-10
2	1	1.2	10	-5
3	1.5	1.4	15	0
4	2	1.6	20	5
5	2.5	1.8	25	10

表 3.14 L25(5^6)正交表部分举例

	A	L	θ	Δt	空列	空列
6	2	1	2	3		
7	2	2	3	4		
8	2	3	4	5		
9	2	4	5	1		

表 3.15 L25(5^6) 部分正交实验安排及结果

	A	L	θ	Δt	空列	空列	μ
6	1	1	10	0			0.3
7	1	1.2	15	5			0.382
8	1	1.4	20	10			0.446
9	1	1.6	25	-10			0.491

1、回归结果:

采用逐步回归法对数据进行处理分析, 结果见表 3.16~表 3.18。

表 3.16 平开窗流量系数多元回归总结

复数相关系数	决定系数	校正的决定系数	标准差
0.979	0.958	0.955	0.03442

表 3.17 平开窗流量系数多元回归方差分析表

	平方和	自由度	均方根	F 值	显著性 sig
回归分析	0.600	2	0.300	253.109	0.000
剩余值	0.026	22	0.001		
总和	0.626	24			

表 3.18 平开窗流量系数多元回归系数表

	未标准化系数 B 值	估计标准差	标准化系数 β	t 检验	显著性 sig
常数	-0.250	0.042		-5.943	0.000
X_{12}	0.238	0.011	0.922	21.181	0.000
X_{11}	-0.053	0.007	-0.330	-7.589	0.000

1) 自变量: $x_1=A$, $x_2=L$, $x_3=\theta$, $x_4=\Delta t$, $x_5=AL$, $x_6=A\theta$, $x_7=A\Delta t$, $x_8=L\theta$, $x_9=L\Delta t$, $x_{10}=\theta\Delta t$, $x_{11}=\ln(A)$, $x_{12}=\ln(L)$, $x_{13}=\ln(\theta)$ 。

2) 因变量: μ

经过逐步回归后, 剔除了自变量 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}$ 从而使最后的回归子集为最优回归子集。回归方程为:

$$\mu = -0.053\ln(L) + 0.238\ln(\theta) - 0.25 \quad (3.14)$$

2、回归诊断:

(1) 见表 3.16, 复相关系数为 0.979, 决定系数为 0.958, 由决定系数看回归方程显著。

(2) 见表 3.17, 方差分析表, F 值为 253.109, 显著性 sig 为 0.000, 表明回归方程高度显著, 说明 x_{12}, x_{13} 整体上对 μ 有显著的线性影响。

(3) 回归系数的显著性检验。由表 3.18 看出自变量 x_{12}, x_{13} 的显著性 sig 均为 0.000, 即这些自变量对 μ 均有显著影响。

3.2.2.2 影响因素分析

从式(3.14)可以看出, 窗口的高宽比以及对平开窗的流量系数的影响更加显著, 而窗口面积以及窗户两侧温度差的影响相对要小些, 于是在逐步多元回归中被剔除了。

首先, 对于窗口的高宽比, 当窗口面积、窗户开度以及两侧温度差一定时, 流量系数随其的增大而逐步减小, 呈对数规律。但窗口面积、窗户开度以及两侧温度差取不同的组合值时, 流量系数的值会不同。例如当 $A=1m^2, \theta=10^\circ, \Delta t=0^\circ C$ 以及 $A=1m^2, \theta=20^\circ, \Delta t=0^\circ C$ 两种情况下, 平开窗流量系数随窗口的高宽比的变化关系如图 3.9 所示。

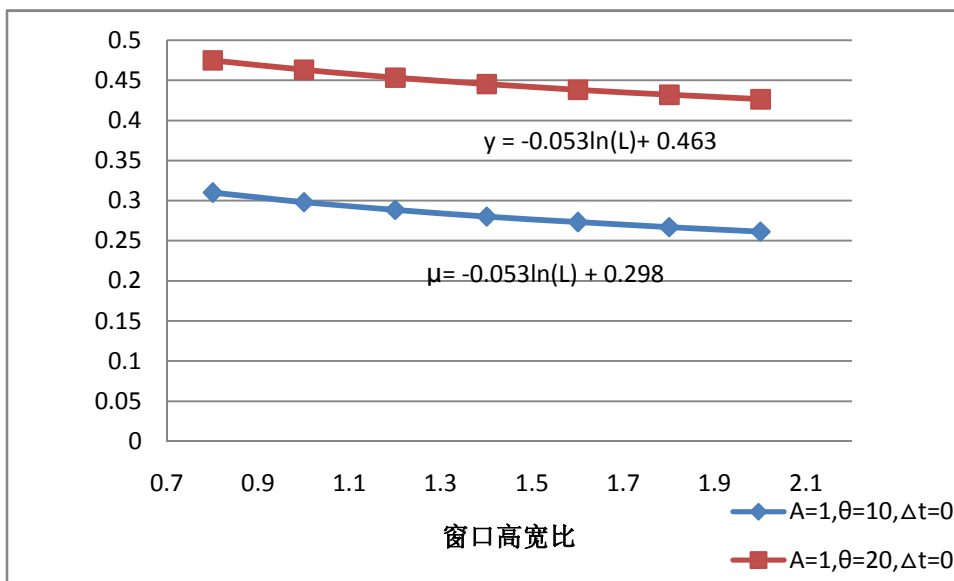


图 3.9 平开窗流量系数随窗口高宽比的变化规律

然后，对于窗户开度，当窗口面积、窗口高宽比以及两侧温度差一定时，流量系数会随着其的增大而增大，呈对数增长规律。但窗口面积、窗口高宽比以及两侧温度差取不同的组合值时，流量系数的值会不同。例如当 $A=1\text{m}^2$ 、 $L=1$ 、 $\Delta t=0^\circ\text{C}$ 以及 $A=1\text{m}^2$ 、 $L=2$ 、 $\Delta t=0^\circ\text{C}$ 两种情况下，平开窗流量系数随窗户开度的变化关系如图 3.10 所示。

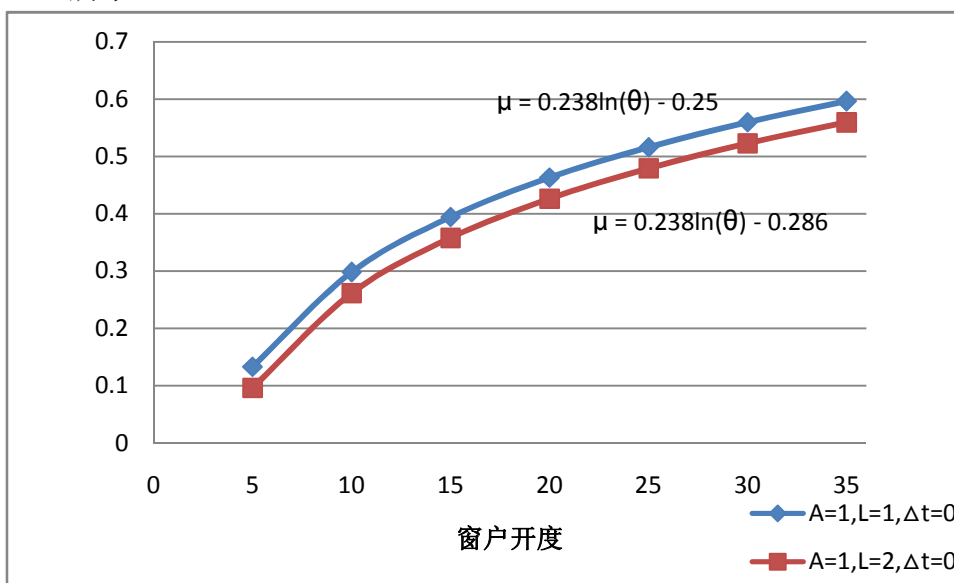


图 3.10 平开窗流量系数随窗户开度的变化规律

3.2.3 推拉窗流量系数影响因素分析

推拉窗采用装有滑轮的窗扇在窗框上的轨道滑行。这种窗的优点是窗无论在开关状态下均不占用额外的空间，构造也较为简单。推拉窗由于不存在开启角度，在此考虑窗口开启率（开启面积与最大可开启面积）。如图 3.11 所示，窗口面

积为 $A=RD$, 窗户高宽比为 $L=D/R$, 窗户开启率为 $k = S/R$ 。

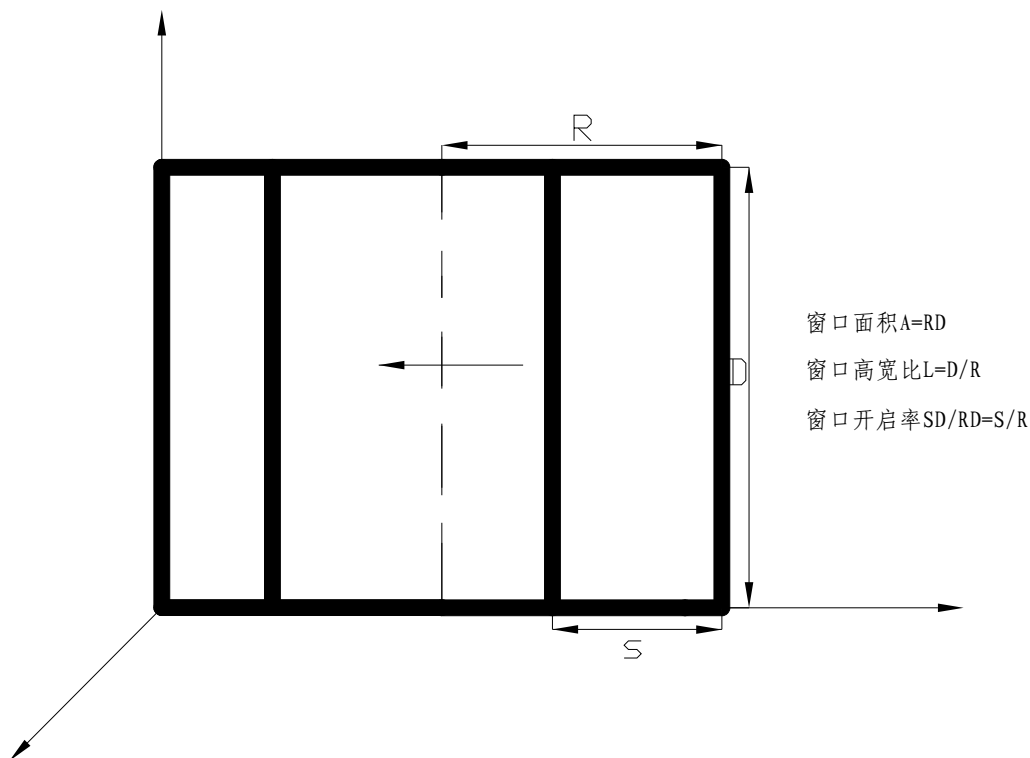


图 3.11 推拉窗示意图

3.2.3.1 多元线性回归分析

同理，由于影响窗口流量系数的因素有四个，本文采用 6 因素 5 水平正交表 $L_{25}(5^6)$ 来分析，一个进行了 25 次试验。各因素的水平划分表见表 3.19。 $L_{25}(5^6)$ 正交表的部分举例见表 3.20 所示。计算得到的部分正交实验安排及结果见表 3.21 所示。

表 3.19 各因素的水平划分表

水平	窗口面积 A	高宽比 L	窗户开启率 k	室外内温差 Δt
	m^2	1	1	$^{\circ}C$
1	0.5	1	15%	-10
2	1	1.2	30%	-5
3	1.5	1.4	45%	0
4	2	1.6	60%	5
5	2.5	1.8	100%	10

表 3.20 $L_{25}(5^6)$ 正交表部分举例

	A	L	k	Δt	空列	空列
6	2	1	2	3		
7	2	2	3	4		
8	2	3	4	5		
9	2	4	5	1		

表 3.21 $L_{25}(5^6)$ 部分正交实验安排及结果

	A	L	k	Δt	空列	空列	μ
6	1	1	0.3	0			0.22
7	1	1.2	0.45	5			0.337
8	1	1.4	0.6	10			0.463
9	1	1.6	1	-10			0.821

对模拟得到的数据进行分析,采用 SPSS 软件进行多元线性回归,结果如下:

1、回归结果:

采用逐步回归法对数据进行处理分析,结果见表 3.22~表 3.24。

表 3.22 推拉窗流量系数多元回归总结

复数相关系数	决定系数	校正的决定系数	标准差
0.999	0.997	0.997	0.01358

表 3.23 推拉窗流量系数多元回归方差分析表

	平方和	自由度	均方根	F 值	显著性 sig
回归分析	1.536	3	0.512	2.779E3	0.000
剩余值	0.004	21	0.000		
总和	1.540	24			

表 3.24 推拉窗流量系数多元回归系数表

	未标准化系数 B 值	估计标准差	标准化系数 β	t 检验	显著性 sig
常数	-0.040	0.08		-5.032	0.000
X_3	0.849	0.009	0.997	91.173	0.000
X_{11}	0.010	0.003	0.041	3.760	0.000
X_1	0.006	0.002	0.033	3.052	0.000

1) 自变量: $x_1=A$, $x_2=L$, $x_3=k$, $x_4=\Delta t$, $x_5=AL$, $x_6=Ak$, $x_7=A\Delta t$, $x_8=Lk$, $x_9=L\Delta t$, $x_{10}=k\Delta t$, $x_{11}=\ln(A)$, $x_{12}=\ln(L)$, $x_{13}=\ln(k)$ 。

2) 因变量: μ

经过逐步回归后, 剔除了自变量 $x_2, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{13}$ 从而使最后的回归子集为最优回归子集。回归方程为:

$$\mu = 0.01 \ln(L) + 0.849k + 0.006A - 0.04 \quad (3.15)$$

2、回归诊断:

(1) 见表 3.22, 复相关系数为 0.999, 决定系数为 0.997, 由决定系数看回归方程显著。

(2) 见表 3.23, 方差分析表, F 值为 2779, 显著性 sig 为 0.000, 表明回归方程高度显著, 说明 x_1, x_3, x_{12} 整体上对 μ 有显著的线性影响。

(3) 回归系数的显著性检验。由表 3.24 看出自变量 x_1, x_3, x_{12} 的显著性 sig 均约为 0.000, 即这些自变量对 μ 均有显著影响。

3.2.3.2 影响因素分析

从式(3.15)可以看出, 窗口面积、窗口高宽比和窗户开启率对推拉窗流量系数的影响更加显著, 而窗户两侧温差的影响相对小些, 于是在多元逐步回归中被剔除了。

首先, 对于窗口面积, 当窗口高宽比、窗户开启率以及两侧温度差一定时, 推拉窗流量系数随其增大而增大, 呈线性增长规律。但窗口高宽比、窗户开启率以及两侧温度差取不同组合值时, 流量系数的值不同。例如当 $L=1, k=0.3, \Delta t=0^\circ\text{C}$ 以及 $L=2, k=0.6, \Delta t=0^\circ\text{C}$ 两种情况下, 推拉窗流量系数随窗口面积的变化关系如图 3.12 所示。

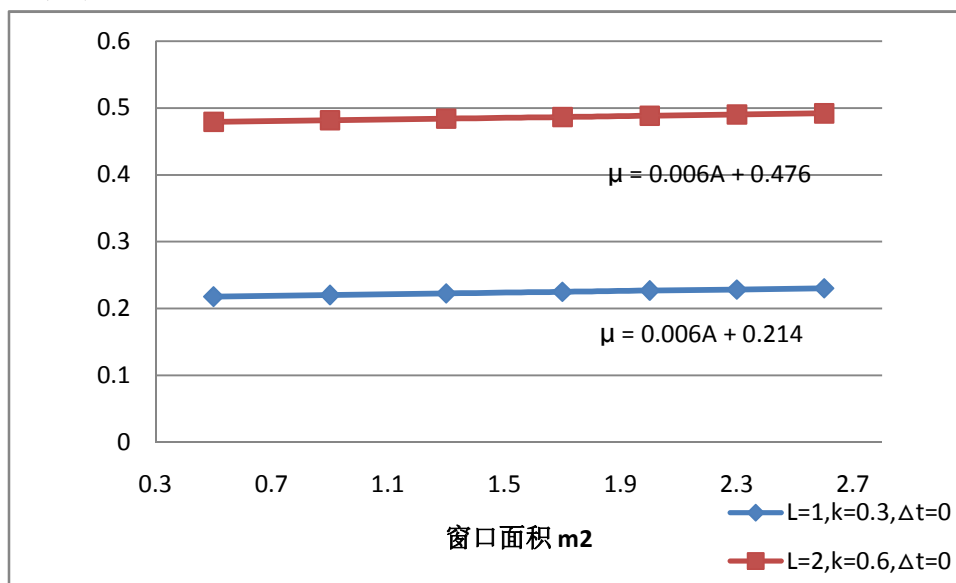


图 3.12 推拉窗流量系数随窗口面积的变化规律

其次，对于窗口高宽比，当窗口面积、窗户开启率以及两侧温度差一定时，推拉窗流量系数随其增大而增大，呈对数增长规律。但窗口面积、窗户开启率以及两侧温度差取不同组合值时，流量系数的值不同。例如当 $A=1$ 、 $k=0.3$ 、 $\Delta t=0^{\circ}\text{C}$ 以及 $A=2$ 、 $k=0.6$ 、 $\Delta t=0^{\circ}\text{C}$ 两种情况下，推拉窗流量系数随窗口高宽比的变化关系如图 3.13 所示。

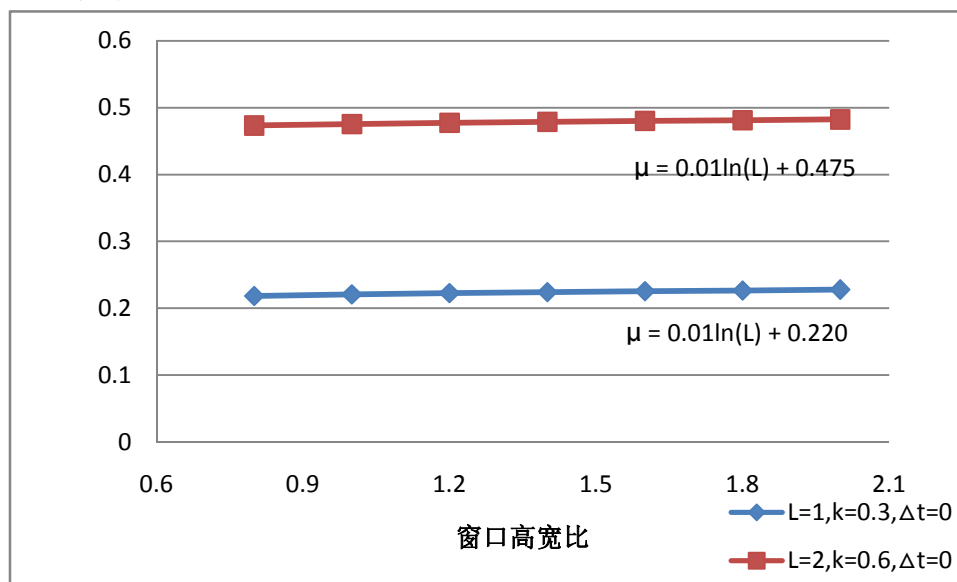


图 3.13 推拉窗流量系数随窗口高宽比的变化规律

最后，对于窗户开启率，当窗口面积、窗口高宽比以及两侧温度差一定时，推拉窗流量系数随其增大而增大，呈线性增长规律。但窗口面积、窗口高宽比以及两侧温度差取不同组合值时，流量系数的值不同。例如当 $A=0.5$ 、 $L=1$ 、 $\Delta t=0^{\circ}\text{C}$ 以及 $A=2$ 、 $L=2$ 、 $\Delta t=0^{\circ}\text{C}$ 两种情况下，推拉窗流量系数随窗户开启率的变化关系如图 3.14 所示。

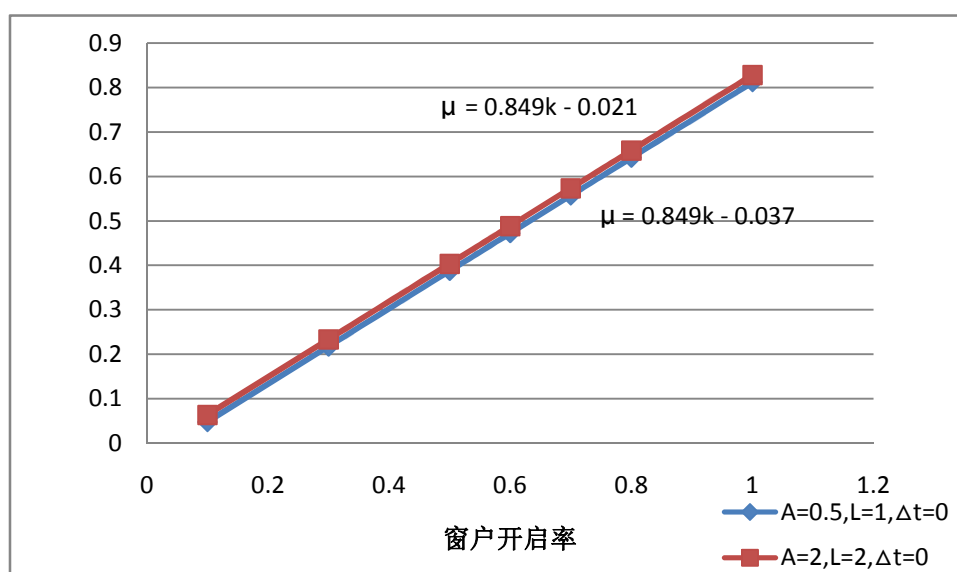


图 3.14 推拉窗流量系数随窗户开启率的变化规律

3.2.4 悬窗流量系数影响因素分析

悬窗是沿水平轴旋转开启的一种窗户，如图 3.15 所示，窗口面积为 $A=RD$ ，窗户高宽比为 $L=D/R$ ，窗口开度为 θ 。

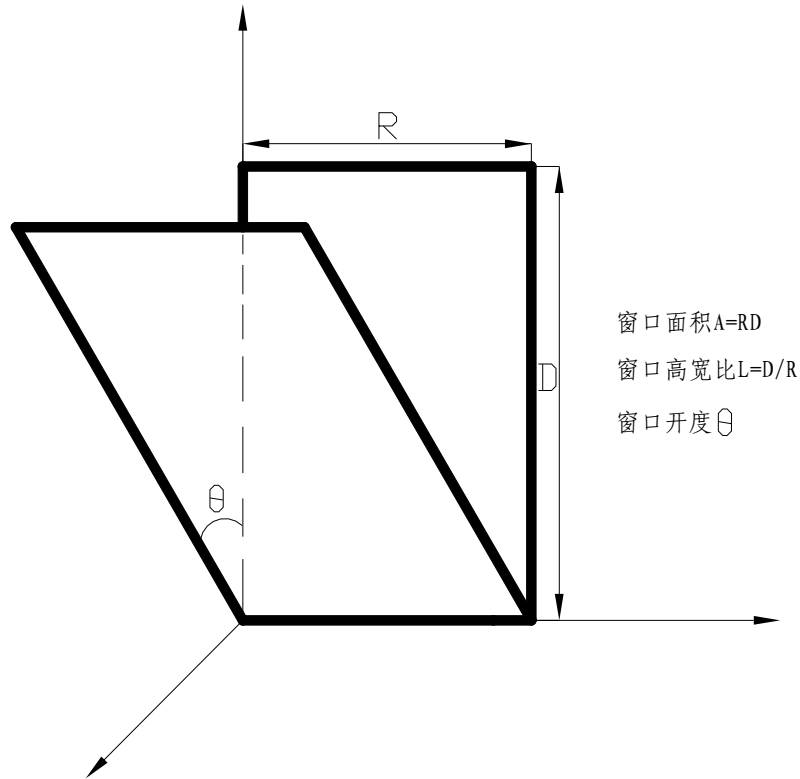


图 3.15 悬窗示意图

3.2.4.1 多元线性回归分析

同理，由于影响窗口流量系数的因素有四个，本文采用 6 因素 5 水平正交表 $L_{25}(5^6)$ 来分析，一个进行了 25 次试验。各因素的水平划分表见表 3.25。 $L_{25}(5^6)$ 正交表的部分举例见表 3.26 所示。计算得到的部分正交实验安排及结果见表 3.27 所示。

表 3.25 各因素的水平划分表

水平	窗口面积 A	高宽比 L	窗户开度 θ	室外内温差 Δt
	m^2	1	$^\circ$	$^\circ C$
1	0.5	0.5	5	-10
2	1	0.7	10	-5
3	1.5	0.9	15	0
4	2	1.1	20	5
5	2.5	1.3	25	10

表 3.26 $L_{25}(5^6)$ 正交表部分举例

	A	L	θ	Δt	空列	空列
6	2	1	2	3		
7	2	2	3	4		
8	2	3	4	5		
9	2	4	5	1		

表 3.27 $L_{25}(5^6)$ 部分正交实验安排及结果

	A	L	θ	Δt	空列	空列	μ
6	1	0.5	10	0			0.36
7	1	0.7	15	5			0.492
8	1	0.9	20	10			0.681
9	1	1.1	25	-10			0.779

采用 SPSS 软件对模拟的数据进行多元回归分析：

1、回归结果：

采用逐步回归法对数据进行处理分析，结果见表 3.28~表 3.30。

表 3.28 悬窗流量系数多元回归总结

复数相关系数	决定系数	校正的决定系数	标准差
0.977	0.954	0.947	0.04423

表 3.29 悬窗流量系数多元回归方差分析表

	平方和	自由度	均方根	F 值	显著性 sig
回归分析	0.853	3	0.284	145.363	0.000
剩余值	0.041	21	0.002		
总和	0.894	24			

表 3.30 悬窗流量系数多元回归系数表

	未标准化系数 B 值	估计标准差	标准化系数 β	t 检验	显著性 sig
常数	0.149	0.026		5.609	0.000
X_3	0.007	0.000	0.891	19.040	0.000
X_1	0.038	0.006	0.286	6.110	0.000
X_{12}	0.054	0.009	0.282	6.020	

1) 自变量: $x_1=A$, $x_2=L$, $x_3=\theta$, $x_4=\Delta t$, $x_5=AL$, $x_6=A\theta$, $x_7=A\Delta t$, $x_8=L\theta$, $x_9=L\Delta t$, $x_{10}=\theta\Delta t$, $x_{11}=\ln(L)$, $x_{12}=\ln(L)$, $x_{13}=\ln(\theta)$ 。

2) 因变量: μ

经过逐步回归后, 剔除了自变量 $x_2, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{13}$, 从而使最后的回归子集为最优回归子集。回归方程为:

$$\mu = 0.007\theta + 0.038A + 0.054\ln(L) + 0.149 \quad (3.16)$$

2、回归诊断:

(1) 见表 3.28, 复相关系数为 0.977, 决定系数为 0.954, 由决定系数看回归方程显著。

(2) 见表 3.29, 方差分析表, F 值为 145.363, 显著性 sig 约为 0.000, 表明回归方程高度显著, 说明 x_3, x_1, x_{12} 整体上对 μ 有显著的线性影响。

(3) 回归系数的显著性检验。由表 3.30 看出自变量 x_3, x_1, x_{12} 的显著性 sig 均为 0.000, 即这些自变量对 μ 均有显著影响。

3.2.4.2 影响因素分析

从式(3.16)可以看出, 窗口面积、高宽比以及窗户开度对悬窗流量系数的影响更加显著, 而窗户两侧的温度差影响相对小些, 于是在逐步多元回归中被剔除了。

首先, 对于窗口面积, 当窗口高宽比、窗户开度以及两侧温度差一定时, 悬窗流量系数随其增大而增大, 呈线性增长规律。但窗口高宽比、窗户开度以及两侧温度差取不同组合值时, 流量系数的值不同。例如当 $L=1, \theta=10^\circ, \Delta t=0^\circ\text{C}$ 以及 $L=2, \theta=20^\circ, \Delta t=0^\circ\text{C}$ 两种情况下, 悬窗流量系数随窗口面积的变化关系如图 3.16 所示。

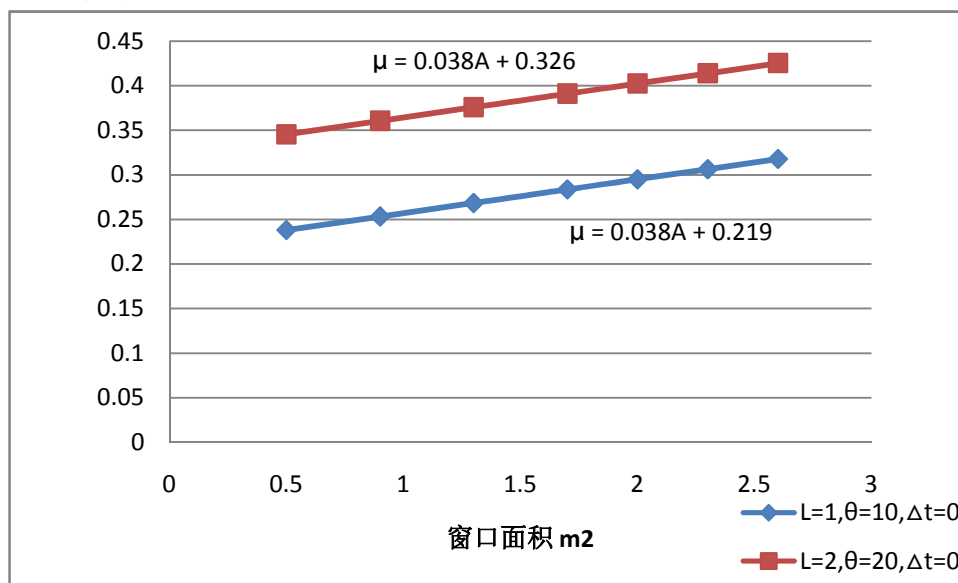


图 3.16 悬窗流量系数随窗口面积的变化规律

其次，对于窗口高宽比，当窗口面积、窗户开度以及两侧温度差一定时，悬窗流量系数随其增大而增大，呈对数增长规律。但窗口面积、窗户开度以及两侧温度差取不同组合值时，流量系数的值不同。例如当 $A=1$ 、 $\theta=10^\circ$ 、 $\Delta t=0^\circ\text{C}$ 以及 $A=2$ 、 $\theta=20^\circ$ 、 $\Delta t=0^\circ\text{C}$ 两种情况下，悬窗流量系数随窗口高宽比的变化关系如图 3.17 所示。

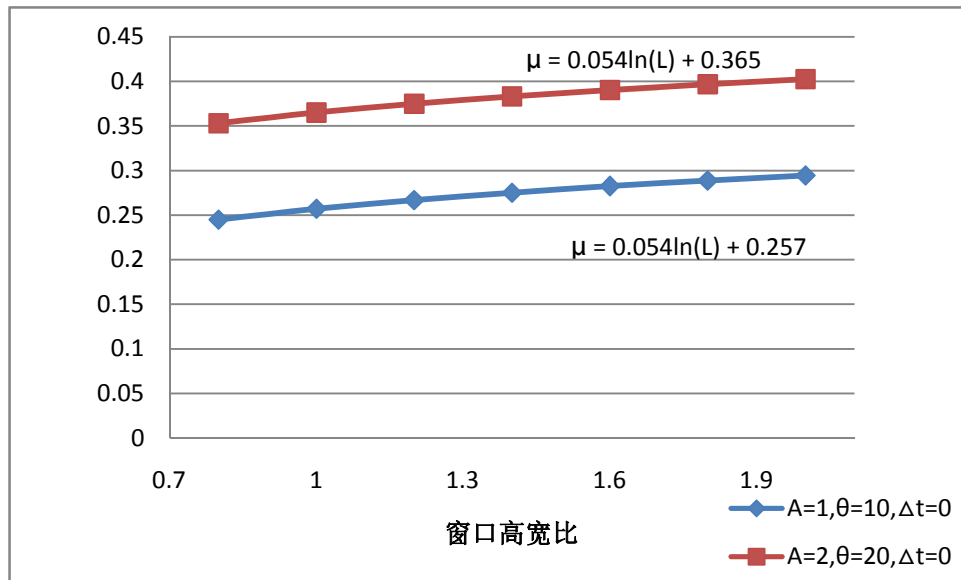


图 3.17 悬窗流量系数随窗口高宽比的变化规律

最后，对于窗户开度，当窗口面积、窗口高宽比以及两侧温度差一定时，流量系数会随着其的增大而增大，呈线性增长规律。但窗口面积、窗口高宽比以及两侧温度差取不同的组合值时，流量系数的值会不同。例如当 $A=1\text{m}^2$ 、 $L=1$ 、 $\Delta t=0^\circ\text{C}$ 以及 $A=2\text{m}^2$ 、 $L=2$ 、 $\Delta t=0^\circ\text{C}$ 两种情况下，悬窗流量系数随窗户开度的变化关系如图 3.18 所示。

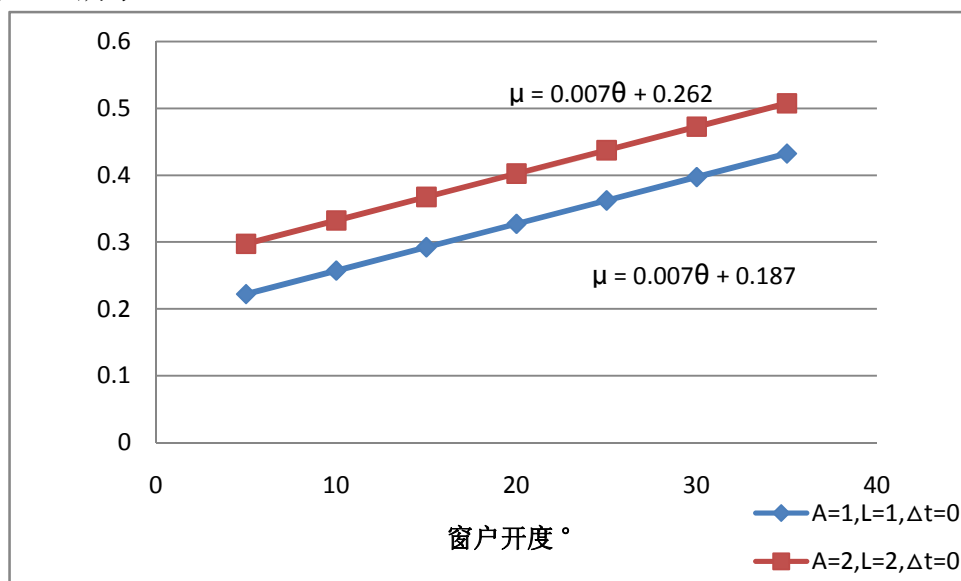


图 3.18 悬窗流量系数随窗户开度的变化规律

3.3 内门流量系数的影响因素分析

自然通风空气流量的另外一个影响量是室内压力，室内压力的大小与室内建筑空间布局、门的大小及流量系数等均有关。由于各建筑室内布局均存在差异，此处就不一一讨论，在本文第四章将以一典型建筑模型为例进行分析，即室内压力可以看成一可求解的定量。

下面分析内门流量系数的影响因素分析，与窗户类似，主要讨论它受门的面积 A 、高宽比 L 以及开启角度 θ 的影响情况。

3.3.1 研究方法及模型参数

本处采用的方法同样是 **Fluent** 模拟计算分析，通过建立实际门的模型，模拟得到相应参数工况下的流量系数，之后分析数据，得到各因素对内门流量系数的影响情况。

物理模型见图 3.19，即将一个按实际模型建立的门置于一定的气流下，测量通过门的空气流量，再根据门两侧的压差即可计算得到流量系数。

湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型。

边界条件：

(1) 入口面

设为速度出口，给定一个速度值，用于确定通过窗口处的空气流量。

(2) 出口面

设为自由出口，空气从出口面流出。

(3) 侧面、底面和顶面

均设为无滑移墙面。

(4) 内门

按照实际模型建立，设为自由出口，根据其两侧的压差作用有空气流进出。

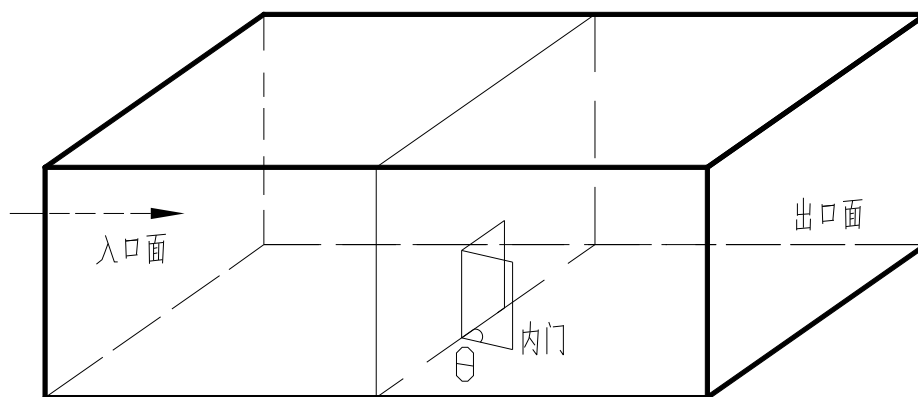


图 3.19 内门流量系数模拟模型图

3.3.2 多元线性回归分析

同理, 由于讨论影响内门流量系数的因素为3个, 本文采用5因素4水平正交表 $L_{16}(4^5)$ 来分析, 一个进行了16次试验。各因素的水平划分表见表3.31。 $L_{16}(4^5)$ 正交表的部分举例见表3.32所示。计算得到的部分正交实验安排及结果见表3.33所示。

表 3.31 各因素的水平划分表

水平	门面积 A	高宽比 L	门开度 Θ
	m^2	1	°
1	1.5	1.5	30
2	2	2	45
3	2.5	2.5	60
4	3	3	90

表 3.32 $L_{16}(4^5)$ 正交表部分举例

	A	L	Θ	空列	空列
6	2	2	1		
7	2	3	4		
8	2	4	3		
9	3	1	3		

表 3.33 $L_{16}(4^5)$ 部分正交实验安排及结果

	A	L	Θ	空列	空列	μ
6	2	2	30			0.435
7	2	2.5	90			0.682
8	2	3	60			0.58
9	2.5	1.5	60			0.617

采用 SPSS 软件对模拟的数据进行多元回归分析:

1、回归结果:

采用逐步回归法对数据进行处理分析, 结果见表 3.34~表 3.36。

表 3.34 内门流量系数多元回归总结

复数相关系数	决定系数	校正的决定系数	标准差
0.950	0.902	0.887	0.03642

表 3.35 内门流量系数多元回归方差分析表

	平方和	自由度	均方根	F 值	显著性 sig
回归分析	0.159	2	0.080	59.994	0.000
剩余值	0.017	13	0.001		
总和	0.176	15			

表 3.36 内门流量系数多元回归系数表

	未标准化系数 B 值	估计标准差	标准化系数 β	t 检验	显著性 sig
常数	-0.331	0.090		-3.678	0.003
X ₉	0.234	0.023	0.893	10.300	0.000
X ₈	-0.044	0.012	-0.323	-3.727	0.003

1) 自变量: $x_1=A, x_2=L, x_3=\theta, x_4=AL, x_5=A\theta, x_6=L\theta, x_7=\ln(A), x_8=\ln(L), x_9=\ln(\theta)$ 。

2) 因变量: μ

经过逐步回归后, 剔除了自变量 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ 从而使最后的回归子集为最优回归子集。回归方程为:

$$\mu = -0.044\ln(L) + 0.234\ln(\theta) - 0.331 \quad (3.17)$$

2、回归诊断:

(1) 见表 3.34, 复相关系数为 0.950, 决定系数为 0.902, 由决定系数看回归方程显著。

(2) 见表 3.35, 方差分析表, F 值为 59.994, 显著性 sig 约为 0.000, 表明回归方程高度显著, 说明 x_9, x_8 整体上对 μ 有显著的线性影响。

(3) 回归系数的显著性检验。由表 3.36 看出自变量 x_9, x_8 的显著性 sig 均小于 0.05, 即这些自变量对 μ 均有显著影响。

3.3.3 影响因素分析

从式(3.17)可以看出, 门的高宽比和开度对门的流量系数影响更加显著, 而门的面积的影响相对小些, 于是在逐步多元回归中被剔除了。

首先, 对于门的高宽比, 当门的面积和门的开度一定时, 门的流量系数随其增大而减小, 呈对数规律。而门的面积和门的开度取不同的组合值时, 流量系数会不同。例如, 当 $A=2, \theta=30^\circ$ 以及 $A=2, \theta=60$ 时, 门流量系数随门的高宽比变化规律如图 3.20 所示。

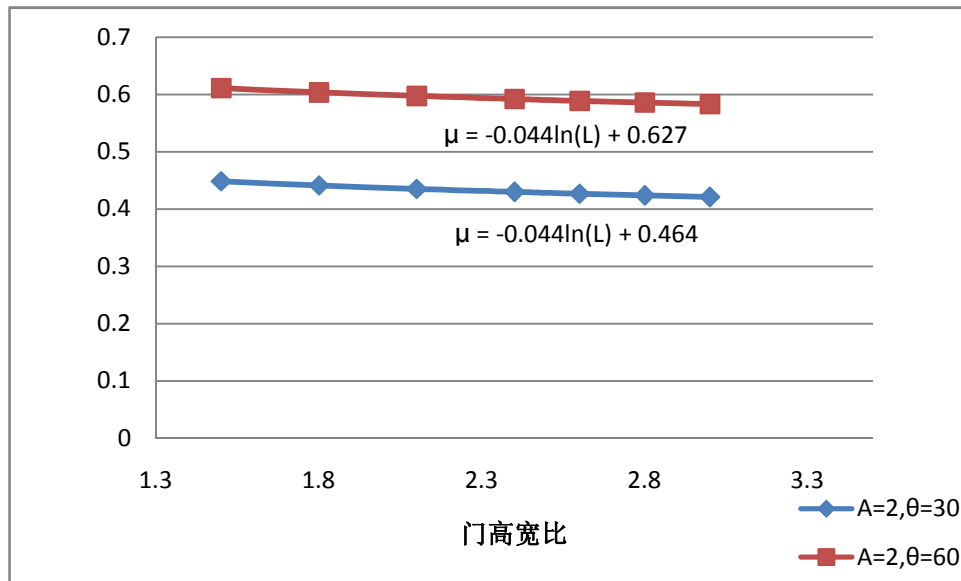


图 3.20 内门流量系数随门高宽比的变化规律

然后，首先，对于门的开度，当门的面积和门的高宽比一定时，门的流量系数随其增大而增大，呈对数规律。而门的面积和门的高宽比取不同的组合值时，流量系数会不同。例如，当 $A=2$, $L=2$ 以及 $A=2$, $L=3$ 时，门流量系数随门的开度的变化规律如图 3.21 所示。

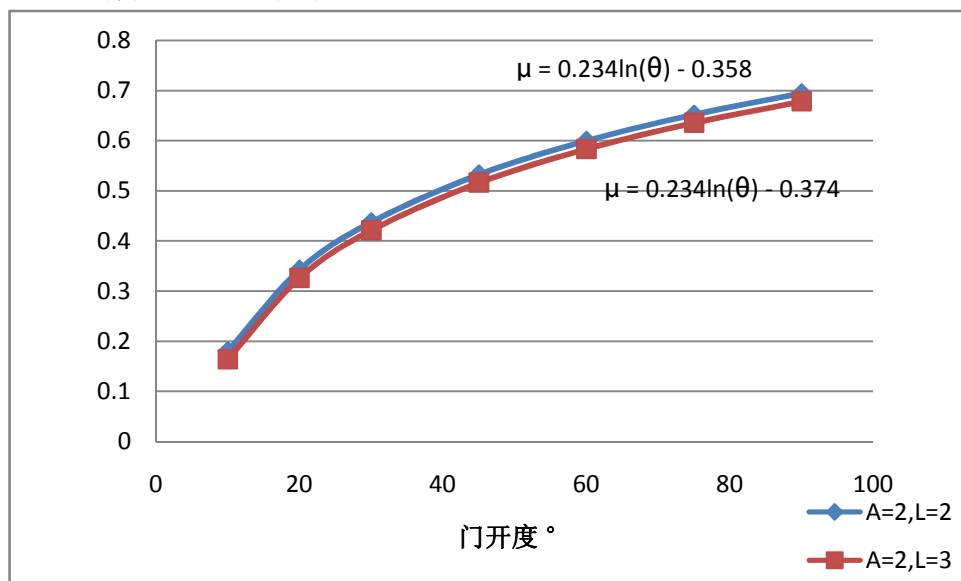


图 3.21 内门流量系数随门开度的变化规律

3.4 实验比对

为了验证本文模拟计算得到的风压系数和流量系数的准确性，本文将模拟数据与风洞实验数据进行比对。由于受实验条件的限制，本文中的风洞实验数据将采用前人的实验结果。本文采用的实验数据是 Takao Sawachi 等人^[50]的实验结果。

该实验的建筑模型大小为 $5.53\text{m} \times 5.53\text{m} \times 3\text{m}$ ，在相对的两侧墙上各有一个推拉窗，窗户大小为 $0.86\text{m} \times 1.74\text{m}$ ，如图 3.22 所示。在室外存在一定风速（窗户中心高度处为 3m/s ）的情况下，在建筑两侧窗户由于产生的风压大小不一样，在室内外风压和热压的共同作用下，室内将产生穿堂风，形成自然空气流动。Takao Sawachi 等人测量了多种不同室外风向条件下的室内空气流量的情况。将其实验数据结果与按照本章的模拟公式进行计算得到的结果进行比较，如表 3.37 及图 3.23 所示。从图中可以看出，按本文公式计算得到的通风换气量与 Takao Sawachi 等人的实验结果吻合的较好。说明本章的公式可以作为以后计算风压系数和流量系数的一个参考。

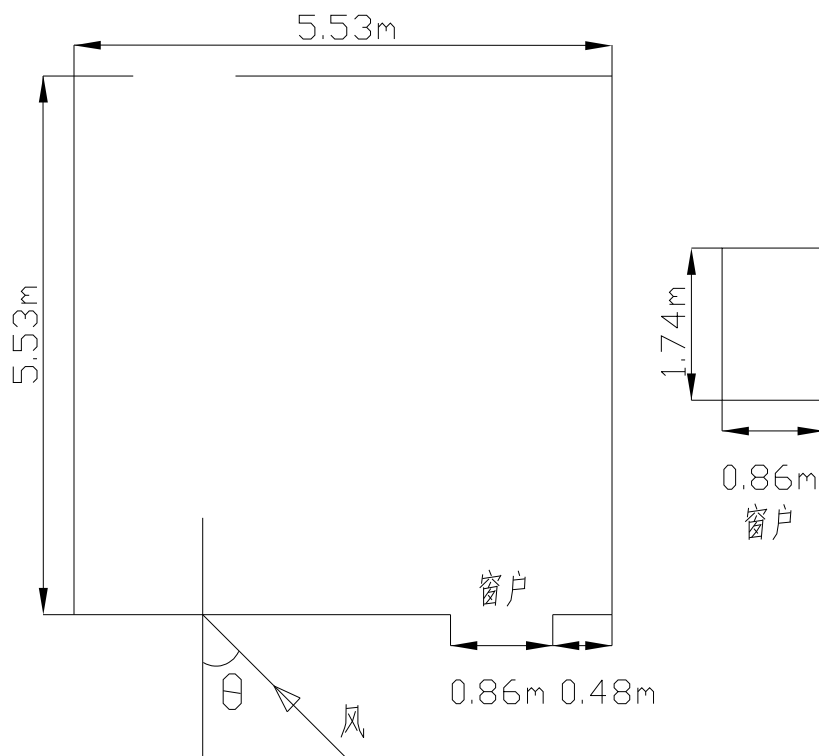


图 3.22 建筑示意图

表 3.37 通风换气量对比表

风向角度°	0	15	30	45	60
计算值 m^3/s	2.53	2.48	2.35	2.11	1.53
实验值 m^3/s	2.28	2.71	2.44	1.94	1.38
误差%	10.9	-8.2	-3.7	8.9	10.9

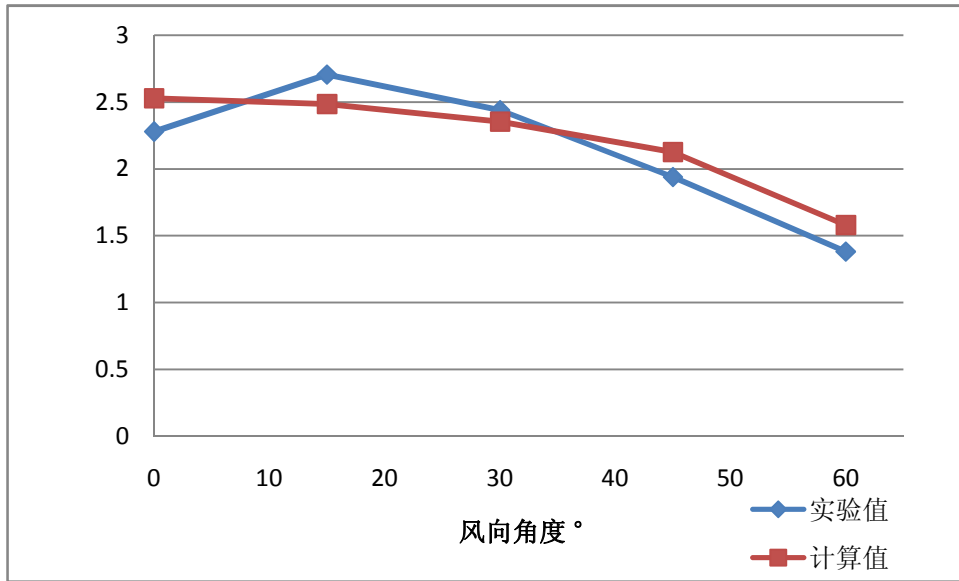


图 3.23 房间通风换气量的对比图

下面以 30° 风向为例说明按照本章的模拟公式结果进行自然通风流量计算的过程:

1、按照公式(3.10)计算风压系数及风压:

迎风面

建筑长宽比 $L=1$, 室外风向角度 $\theta = 30^\circ$, 窗户中心高度 $h=1.3\text{m}$,

$$C_{P1} = 0.039h\cos\theta - 0.028h\sin\theta + 0.07L\cos\theta + 0.006Lh - 0.014 = 0.092$$

背风面

建筑长宽比 $L=1$, 室外风向角度 $\theta = 165^\circ$, 窗户中心高度 $h=1.3\text{m}$,

$$C_{P2} = 0.039h\cos\theta - 0.028h\sin\theta + 0.07L\cos\theta + 0.006Lh - 0.014 = -0.117$$

由于实验时 1.3m 高度处风速为 3m/s , 按照式(2.20)计算得到 10m 高度处的风速:

$$V_{10} = \frac{1.3}{\left(\frac{1.3}{10}\right)^{0.33}} = 5.88 \text{ m/s}$$

于是

$$P_1 = \frac{1}{2} C_{P1} \rho V_{10}^2 = 1.905 \text{ Pa}$$

$$P_2 = \frac{1}{2} C_{P2} \rho V_{10}^2 = -2.431 \text{ Pa}$$

2、窗户流量系数计算

两个窗户完全相同, 均为推拉窗, 且窗户高宽比 $L=2.02$, 窗户开度 $K=1$, 窗户面积 $A=1.5\text{m}^2$,

根据式(3.15)计算得到

$$\mu = 0.01 \ln(L) + 0.849k + 0.006A - 0.04 = 0.825$$

3、窗户流量的计算

设室内压力为 P_0 ，则有

$$Q_1 = \mu A \sqrt{\frac{2(P_1 - P_0)}{\rho}}$$

$$Q_2 = \mu A \sqrt{\frac{2(P_0 - P_2)}{\rho}}$$

由 $Q_1 = Q_2$ ，可得

$$P_0 = \frac{P_1 + P_2}{2} = -0.12 \text{ Pa}$$

于是

$$Q_1 = \mu A \sqrt{\frac{2(P_1 - P_0)}{\rho}} = 2.35 \text{ m}^3/\text{s}$$

也即工况 1 下按公式计算得到的空气流量为 2.35m³/s。

3.5 本章小结

本章分析了建筑表面风压系数以及三种常见的平开窗、推拉窗和悬窗以及内门的流量系数的影响因素影响情况。

(1) 分析了单体建筑表面风压系数受建筑平面面积、建筑长宽比、室外来流风向、高度以及水平相对位置的影响情况，并利用 SPSS 软件逐步回归得到了相应的公式。

(2) 分析了建筑表面风压系数受周围建筑的影响情况，并得到了相应的修正量。

(3) 分析了平开窗、推拉窗以及悬窗的流量系数受窗户面积、窗户高宽比、窗户开度以及窗户两侧温度差的影响情况，并利用 SPSS 软件逐步回归得到了相应的公式。

(4) 分析了内门的流量系数受窗户面积、窗户高宽比以及窗户开度的影响情况，并利用 SPSS 软件逐步回归得到了相应的公式。

(5) 将模拟得到的计算结果与实验数据进行了对比，结果表明，模拟得到的数据具有可行性，回归得到的公式可用于相关计算。

第4章 自然通风利用潜力分析研究

自然通风作为一种经济有效的通风方式,不仅能改善室内空气品质,提高人体的舒适性,同时还将能够节省能源,减少环境污染。由于不同气候条件下利用自然通风的潜力有很大的差异,因此准确的计算和提供各个气候区的自然通风潜力对自然通风的应用与推广至关重要。自然通风利用潜力的影响因素主要有建筑周围微环境和建筑本身特性两个方面。前者包括室外空气干球温度、室外空气相对湿度、室外风速和风向等室外气象参数、城市结构及建筑布局、室外空气污染情况、以及室外噪声情况等。后者包括室内热源、建筑蓄热性能、室内污染源、通风开口的大小及位置、建筑朝向、建筑内部布局、室内空气品质要求以及室内舒适性温度范围等。

然而,目前我国对自然通风的研究还不够成熟,还不能提供各地区自然通风利用潜力等基础数据与资料。因此,选取合适的方法和评价指标计算得到各地区的自然通风潜力显得很紧迫和重要。

4.1 自然通风利用潜力的研究方法和评价指标

近年来,国内外对自然通风的利用潜力研究较多,常用的分析方法和评价指标主要有有效压差分析法、气候适应性法和多标准评估法^[51]三种:

1、有效压差分析法

有效压差分析法是一种从自然通风理论上进行分析的方法,它采用一种两参数回归模型来计算有效压差,有效压差表示为室内外温差和风速这两个参数的函数。同时通过对于不同的气象数据、建筑朝向和维护结构的研究分析这些参数的稳定性和不确定性。另外模型还引入了NAD(natural airing devices)对整个渗透风量进行调整,如果自然通风不足,可通过改变窗户的面积来调整渗透风量。自然通风分析过程可以分为四步:首先,计算有效压差,并应用典型气象年数据确定压差的频率和累积频率分布情况;其次,采用合适的流量系数,根据理想的通风量计算建筑所需的最小压差;再次,应用前面得到的结论,计算仅靠自然通风就能满足所需通风量的时间累积值;最后,设计者可以根据第三步选择改变NAD的大小调整流量系数,以取得建筑中合适的自然通风。这种模型虽然是基于自然通风的基本理论而建立的,但是其所建模型较为粗糙,有效压差被简单的视为热压和风压叠加之和,不能很好的反映热压和风压共同作用的结果。

2、气候适应性法

气候适应性法的原理是先根据房间内人的热舒适性要求得到相应的热舒适温度范围,再根据房间的热破坏原理得到自然通风在满足室内热舒适性情况下对应的室外气象参数,最后对这些参数进行分析研究得到自然通风的利用潜力。

(1) 美国商业建筑的自然通风潜力分析方法^[52]

该方法根据热平衡原理,房间内的总失热量等于总得热量。它假设建筑围护结构绝热性能良好,并不考虑其热惰性。于是房间主要通过通风来传递热量,从而可以建立起稳态模型,室内外温差可通过内部得热量和房间通风换气率相除计算得到。该方法先假设内部得热量为某具体值,再根据ASHRAE标准规定的冬夏季舒适区规定的通风舒适区对应的室内温度范围,从而利用稳态模型可以计算得到自然通风对应的室外温度范围,最后分析该地区的室外气象参数,得到自然通风能够满足室内舒适的全年小时百分数,以及夜间通风能抵消余热的天数百分数,即得到了该地区的自然通风利用潜力。

(2) 度日数法^[53]

自然通风度日数法类似于供暖度日数的定义,也是根据热平衡原理。根据冬季或夏季的室内设定温度,可分别得到相应的室外供热或制冷平衡点温度,当室外温度在这两个平衡点温度之间时,就是适合自然通风的温度。通风度日数就是指适合自然通风区间的温度数与其天数的乘积之和,通风度日数数值越大,表明自然通风潜力越大。因此,根据不同地区的气象资料就可计算得到各地区的通风度日数或根据多年来的气象数据记录研究各月平均概率分布情况,再应用平衡点的温度、当月的天数等参数可估计得到当月的通风度日数。这类基于气候适应性的分析方法主要是根据典型的气象数据来确定适合自然通风的时段,而没有从自然通风作用力上分析。同时,它做了许多假设,忽略了外界风速风向、周围地形等影响因素,大大降低了模型的精度。

3、多标准评估法

由于前两种方法均仅从室外气象参数以及风压和热压的简单叠加来进行分析,忽略了自然通风的很多其他影响因素,模型较粗糙,因而不能准确地评价某地区的自然通风潜力。多标准评估法就是综合考虑室外气象参数、建筑结构及周围微环境、室外空气污染情况、室外噪声情况以及室内热舒适性温度范围等因素进而来评估该地区的自然通风利用潜力。

国内外的多标准评估方法有很多。比如,有种方法^[54]认为如果某地区能够建造具有良好通风的建筑,则可认为该地区具有良好的自然通风潜力。该方法提出了多个评估标准,包括:气象标准(宏观风速风向分布、宏观温度分布、空气湿度、太阳辐射),城市标准(微观风速风向分布、微观温度分布、建筑规划、城市地形、室外空气污染情况、室外噪声等)。该方法分为两个阶段:首先选择

评估自然通风潜力的相关数据,包括室外气象数据、建筑群布局和建筑高度等。通过输入这些数据得到 GIS 信息层,并将其作为其中的一个标准参与评估。然后,根据多标准评估的结论,建立一个新的 GIS 信息层来评估通风潜力。有学者利用该模型选取了法国三个城市进行了实验,并将该评估模型的结果与实测和 CFD 预测结果进行了对比验证。该方法要求要有全面的地理信息数据,因此在实践中较难实现。Qualiflex 矩阵法^[55]也是一种多标准自然通风潜力的分析方法,它综合考虑风压、热压、室外噪声、室外空气清洁度等对自然通风的利用影响。

国内有学者提出了自然通风压差帕时数用于评价自然通风潜力^[56]。压差帕时数是指建筑可提供的高于自然通风所需最小的压差的那些压差数与具有此压差数的小时数的乘积之和。压差帕时数越大表明自然通风潜力越大。该评估方法大致分为三步:首先确定典型年的气象参数,包括室外逐时温度、湿度、风速大小和方向、太阳辐射等。其次,根据典型年的气象数据,计算得到建筑自然通风可以提供的压差,以及满足室内热舒适性要求时所需的最小压差,从而求出压差帕时数。最后,根据压差帕时数评价该地区的通风潜力。

本文将根据室内的舒适性温度、湿度和风速范围,基于热平衡原理,算出满足室内热舒适条件的室外参数,在根据上海典型年的气象参数统计得到上海地区自然通风的可用小时数,从而确定上海地区自然通风的利用潜力。

4.2 上海地区办公建筑自然通风利用潜力的研究

4.2.1 上海地区的气候特性

上海位于北纬 31°11', 东经 121°29', 滨江临海,属亚热带季风气候,呈现季风性、海洋性气候特征。冬季寒冷夏季炎热,四季分明,全年气候湿润。下面以上海典型年气象数据分析上海全年室外气象条件。“典型气象年”的定义为:以近 30 年的月平均数据为基准,从近 10 年的气象资料中选取一年中各个月接近 30 年平均值的数据作为典型气象年数据。由于选取的月平均值可能在不同的年份,气象参数可能不连续,于是需要进行月间平滑处理。

1、温度和湿度

上海室外全年逐时温度和相对湿度见图 4.1~4.2 所示。图 4.3 为全年各月的月平均温度和相对湿度。从图中可以看出,上海地区全年温度变化较大,冬季寒冷,如 1 月份的月平均温度为 2.2℃,夏季炎热,如 7 月份的月平均温度为 28.8℃。全年湿度变化不大,全年平均相对湿度达 76%,属湿润气候。

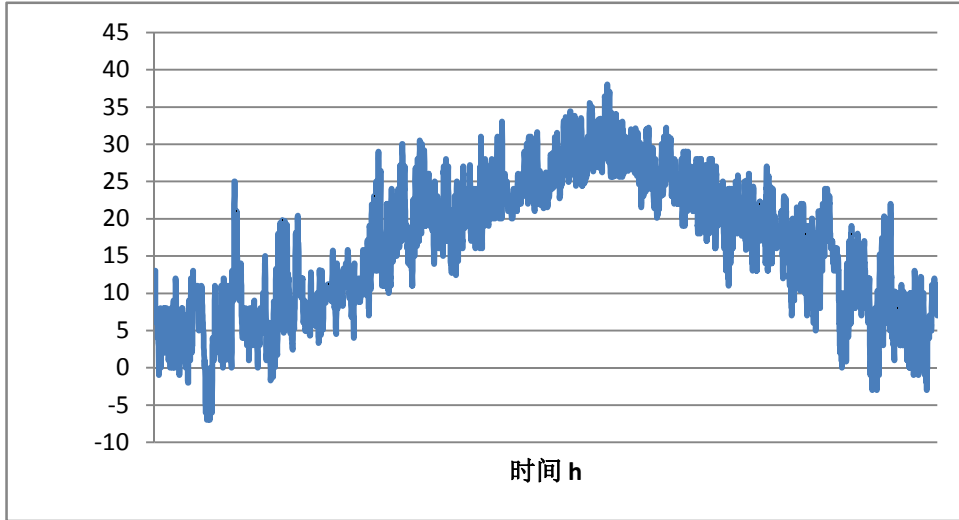


图 4.1 上海典型气象年室外逐时温度

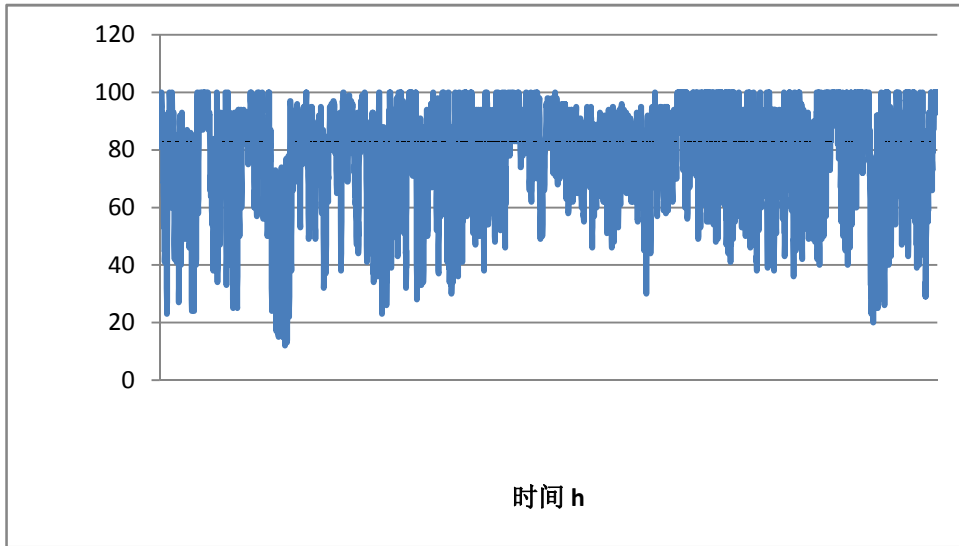


图 4.2 上海典型气象年室外逐时相对湿度

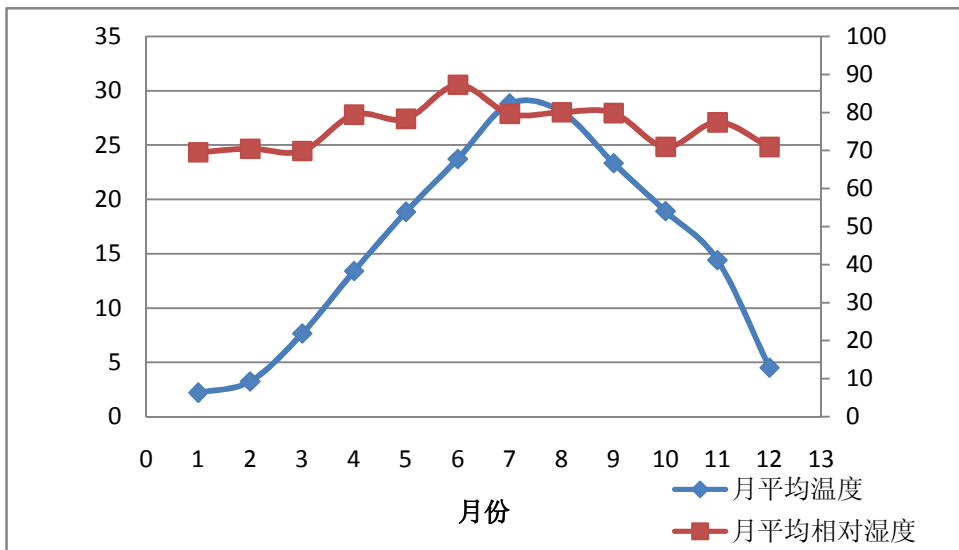


图 4.3 上海典型气象年室外逐月平均温度和相对湿度

2、风速

根据上海典型年气象数据分析,上海一年四季的风速方向会有较大变化,本文将按逐月的数据来分析室外风速的规律。各个季节 10m 高度处的风速大小和方向的统计数据见图 4.4~图 4.8。

从图中可以看出,每个月的主导风向和风速大小均有较大的差别,表 4.1 为统计得到的每个月主导风速大小和主导风向。例如 3 月的主导风速为 3m/s, 风速风向为东风(与北向呈顺时针 90°)。

表 4.1 上海典型气象年室外逐月主导风速和风向

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
主导风速	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3
主导风向	292	337	90	90	157	90	180	90	0	0	0	0

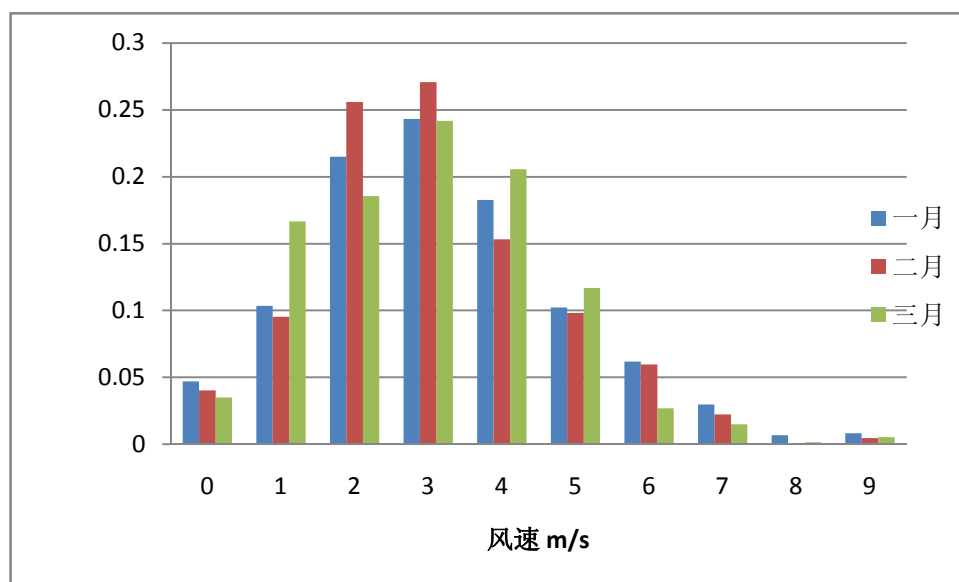


图 4.4 1~3 月风速大小分布频率图

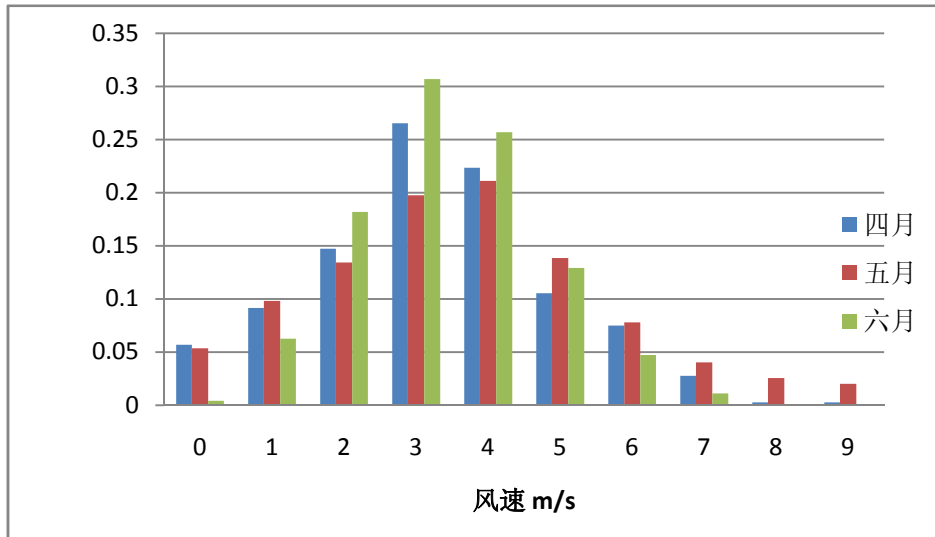


图 4.5 4~6 月风速大小分布频率图

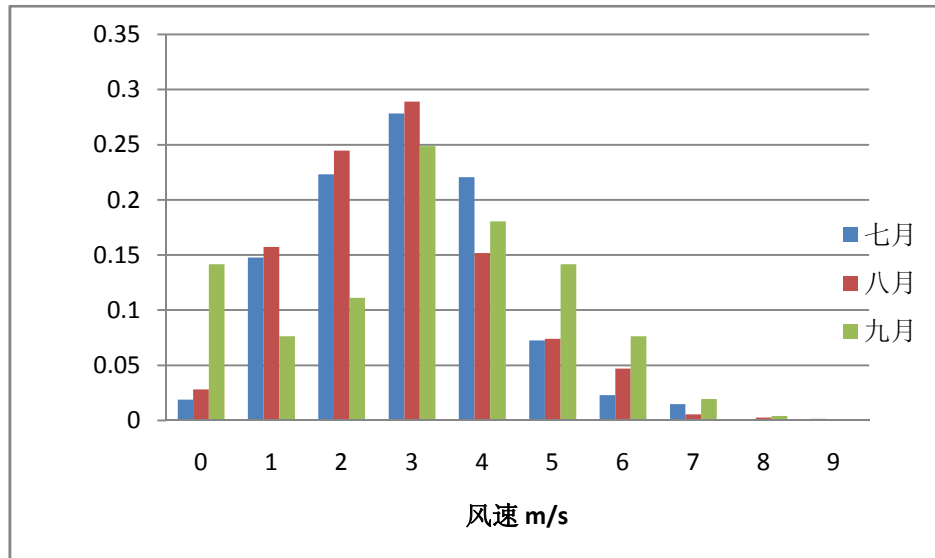


图 4.6 7~9 月风速大小分布频率图

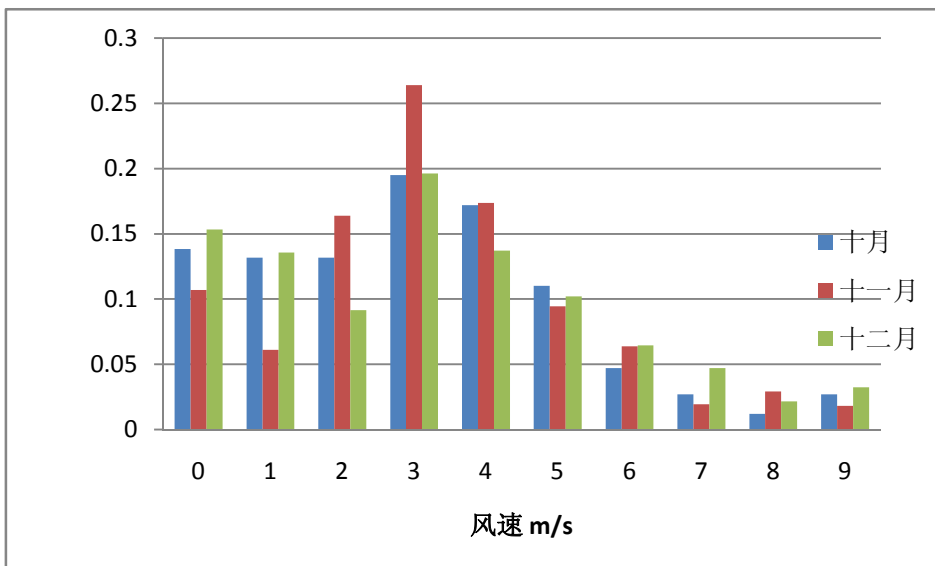


图 4.7 10~12 月风速大小分布频率图

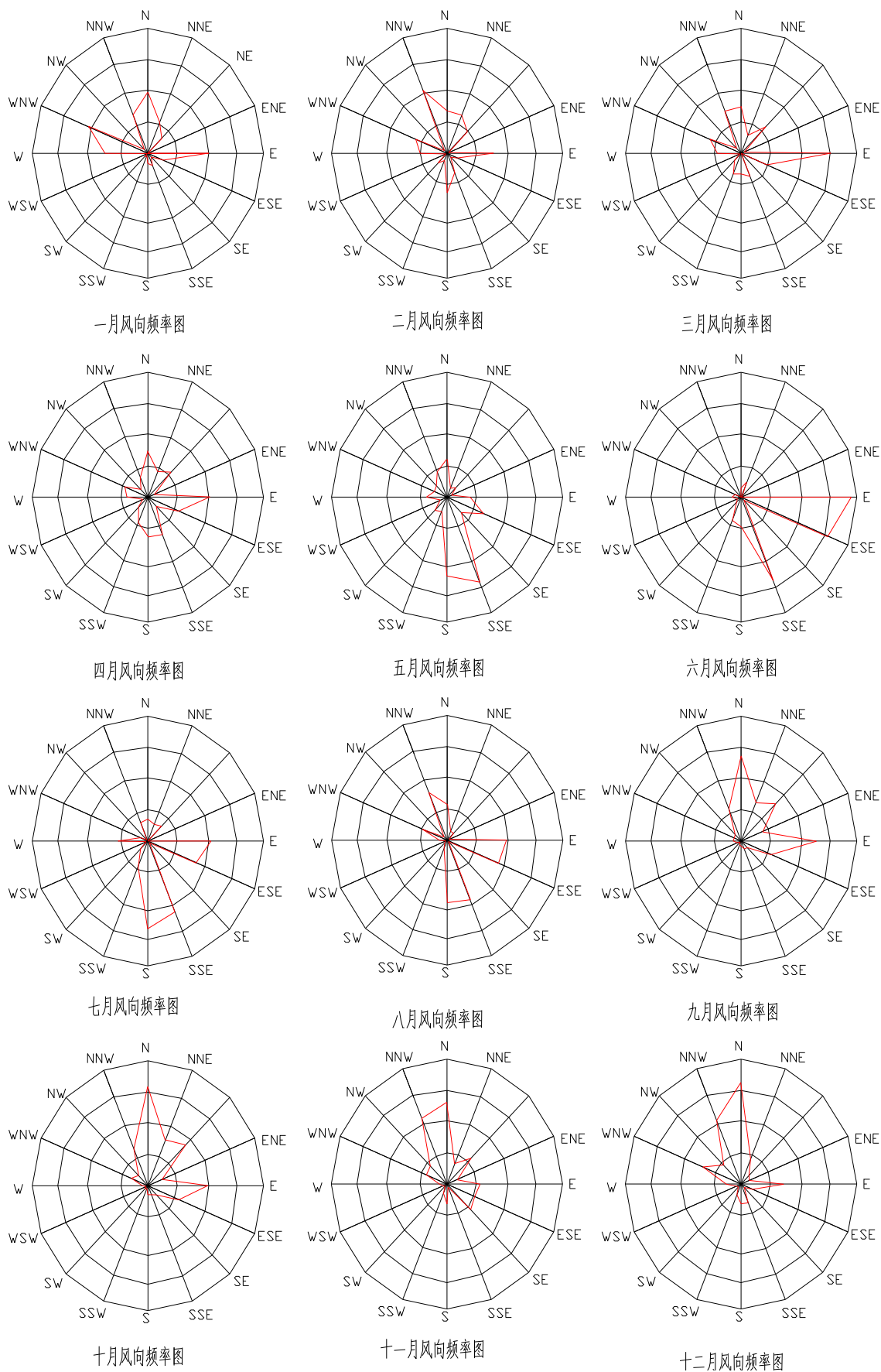


图 4.8 各月风向频率图

4.2.2 室内热舒适性范围

目前我国计算室内热舒适性主要以 ASHRAE55-2004^[57]为基准建立的。但是，这个标准当初建立是基于空调稳态环境下的舒适性研究得出的，已有很多的研究和实验证明，自然通风条件下的室内热舒适性与之存在较大的差别。自然通风环境是一种动态环境，它强调人的热适应能力，即人们可以通过行为调节（开、关窗，加、减衣服，运动或静止等）、心理适应（热经历和热期望的改变）和生理适应（出汗、颤抖等）逐步减少环境对人体器官的刺激。因此，二者要求的室内舒适性温度范围会有所不同，不能简单地将机械空调系统研究的室内舒适温度用于自然通风环境的情况下。以前有关空调环境下人的舒适性评价指标如 PMV 指标等也不适用于自然通风情形。于是人们研究提出了修正的 PMV 模型、适应模型等等用于评价自然通风室内热舒适性指标。

其中修正的 PMV 模型的提出是由于计算得到的 PMV 值与调查得到的人们热感觉不一致，于是 Fanger 教授^[58]分析是由于人们的热感觉期望不同所致，于是提出根据不同的建筑类型、不同的地区以及周围环境中使用空调的建筑的多少，将计算得到的 PMV 乘以一个相应的系数。

$$PMV_e = e \times PMV \quad (4.1)$$

此系数 e 的取值为 $0.5 \sim 1$ 。对于全空调的建筑， $e=1$ ；全年气候温和，其它建筑很少或者没有装空调时， $e=0.5$ ，其它有较多建筑装空调时， $e=0.7$ ；仅夏季温和，其它建筑很少或者没有装空调时， $e=0.7 \sim 0.8$ ，其它有较多建筑装空调时， $e=0.8 \sim 0.9$ ；仅夏季很短一段时间气候温和的地区，其它有较多建筑装空调时， $e=0.9 \sim 1$ 。

而适应模型是考虑了人的适应能力。适应模型认为，PMV 指标建立的基础—热量平衡模型是严格的实验室产物。实验过程中，人被看作是人造环境中天气变化的被动接受者，而不是实际情况下可在更大的温度范围内自然调节的适应者。因此现有的热舒适标准的热量平衡模型并不能反映出人们感受环境、改变行为或逐步调整自己的期望值以适应环境的复杂方式，人们对温度的实际选择标准和基于实验基础上的标准相去甚远。适应模型认为人体有3种基本的适应模式^[59]，即生理适应、心理适应和行为适应。该模型认为，室内最佳舒适性温度与室外的月平均温度有关：

$$t_{\text{comf}} = \begin{cases} 19.35 & t_{\text{a,out}} \leq 5 \\ 0.31t_{\text{a,out}} + 17.8 & 5 < t_{\text{a,out}} < 33 \\ 28.03 & t_{\text{a,out}} \geq 33 \end{cases} \quad (4.2)$$

其中， t_{comf} 为室内最佳舒适性温度， $t_{\text{a,out}}$ 为室外月平均温度。

按照人们 80%和 90%的可接受舒适度即可定义一个舒适性温度的范围。如

图 4.9 所示，当 80% 的人可接受时，热舒适温度范围为 7℃；当 90% 的人可接受时，热舒适温度范围为 5℃。

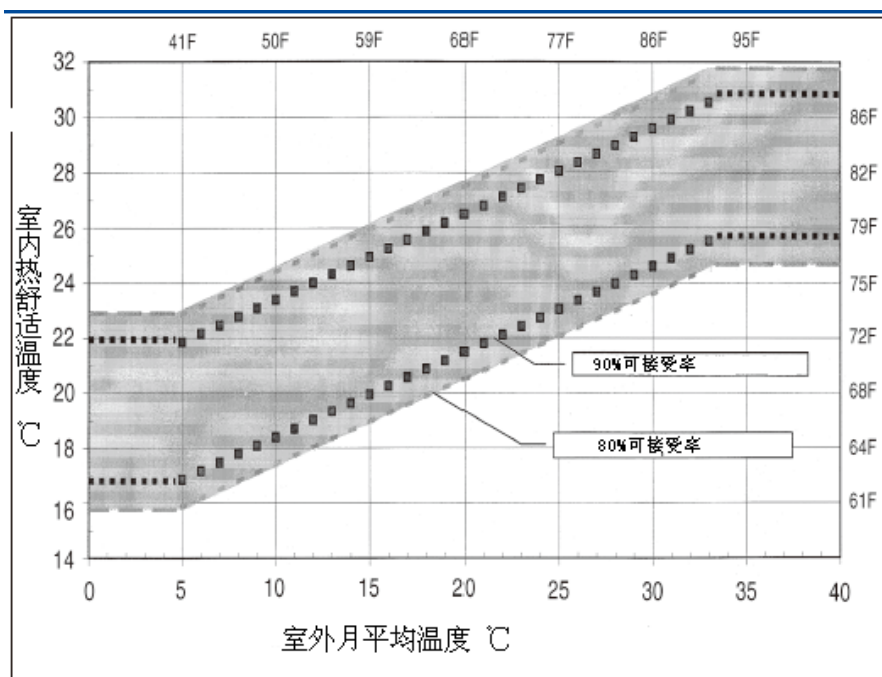


图 4.9 室内热舒适性温度范围

本文将采用适用性模型来确定室内舒适温度范围，由于上海地区的室外全年逐月月平均温度不同，求得各月的室内最舒适温度见表 4.2 所示。同时，按照室内人员 80% 的可接受率来确定舒适性温度上下范围。由于本文以办公建筑为例进行分析，在 7、8 月份由于室外的月平均温度很高，若采用自然通风，按式(4.2)计算得到的最高室内舒适温度较高，不符合办公建筑这种使用人群，因此取此时的最高室内舒适温度为 28℃。

表 4.2 室内逐月最舒适温度

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t_{comf}	19.35	19.35	20.18	21.95	23.64	25.15	26.73	26.49	25.04	23.66	22.27	19.35

4.2.3 上海地区的自然通风利用潜力的研究

下面本文将以上海一栋典型办公建筑来分析上海地区采用自然通风的利用潜力。该建筑共 10 层，层高为 4m。每层平面布局相同，建筑平面图见图 4.10 所示，建筑长宽大小为 50m×30m，长边处于南北方向。建筑分内外区，外区进深为 5m，内区为敞开式办公室，外区四个方向有三种尺寸的共计 8 个房间（10m×5m×4m 尺寸的有 4 个、15m×5m×4m 和 35m×5m×4m 尺寸的各 2 个），内区和外区房间之间通过一 1m×2m 的内门相连。建筑四面外墙上均有外窗（平开

窗), 其中窗墙比为 40%, 可开启外窗面积占窗户面积的大小为 30%, 一共有四种尺寸, 即大小为 1.2m×2m、2.4m×2m、3.6m×2m 以及 8.4m×2m。

该办公建筑外墙传热系数为 1W/m²·K, 屋顶传热系数为 0.7W/m²·K, 窗户传热系数为 3W/m²·K。室内人员密度为 0.25 人/m², 设备密度为 20W/m², 照明密度为 11 W/m²。

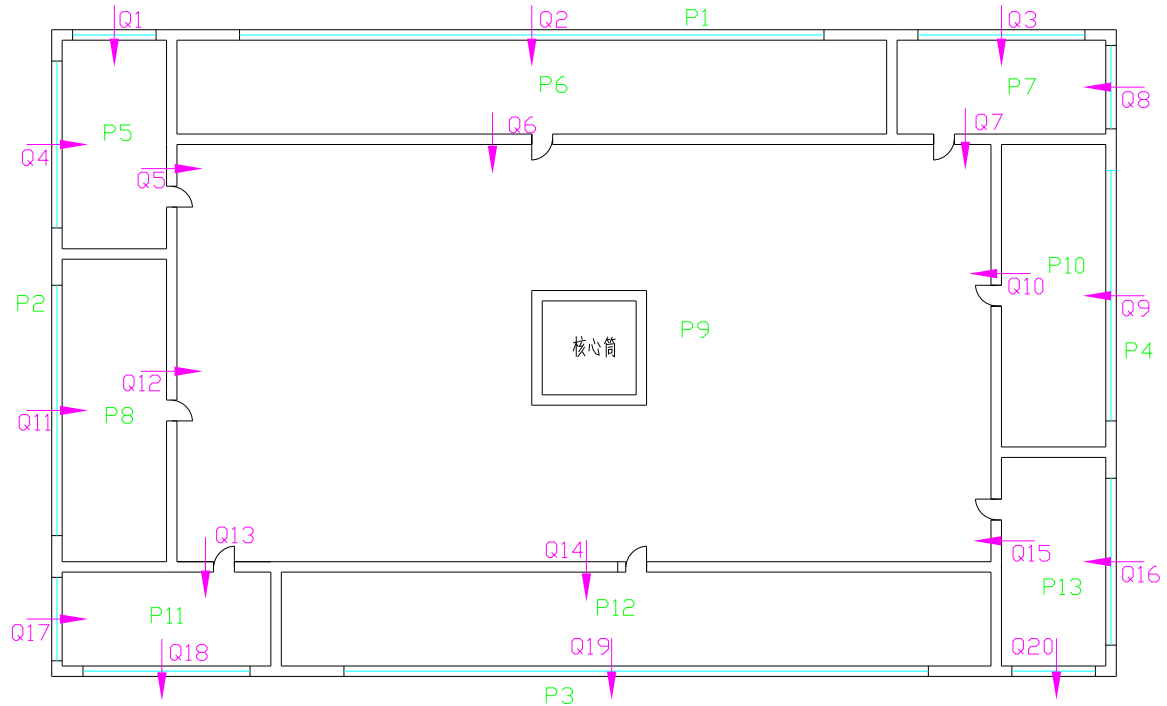


图 4.10 建筑平面示意图

4.2.3.1 通风换气量计算

建筑自然通风的通风换气量是自然通风调节室内热环境好坏的一个重要参数。假设外窗和内门打开最大角度 (其中门为 90°, 外窗为 30°), 计算此时的室内通风换气量。

如图 4.10, 当外窗和内门均打开时, 外区房间与室外空气之间通过外窗存在热质交换, 外区房间和内区房间之间通过内门也存在热质交换。

根据自然通风量的计算公式, 对每个开启的外窗和内门, 有:

$$Q_1 = \pm \mu_1 A_1 \sqrt{\frac{2|P_1 - P_5|}{\rho}} = \mu_1 A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_1 - P_5)}{\sqrt{|P_1 - P_5|}}}$$

$$Q_2 = \mu_4 A_4 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_1 - P_6)}{\sqrt{|P_1 - P_6|}}} \quad Q_3 = \mu_3 A_3 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_1 - P_7)}{\sqrt{|P_1 - P_7|}}}$$

$$Q_4 = \mu_3 A_3 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_2 - P_5)}{\sqrt{|P_2 - P_5|}}} \quad Q_5 = \mu_5 A_5 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_5 - P_9)}{\sqrt{|P_5 - P_9|}}}$$

$$\begin{aligned}
Q_6 &= \mu_5 A_5 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_6 - P_9)}{\sqrt{|P_6 - P_9|}}} & Q_7 &= \mu_5 A_5 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_7 - P_9)}{\sqrt{|P_7 - P_9|}}} \\
Q_8 &= \mu_1 A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_4 - P_7)}{\sqrt{|P_4 - P_7|}}} & Q_9 &= \mu_3 A_3 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_9 - P_6)}{\sqrt{|P_9 - P_6|}}} \\
Q_{10} &= \mu_5 A_5 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_{10} - P_9)}{\sqrt{|P_{10} - P_9|}}} & Q_{11} &= \mu_3 A_3 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_2 - P_8)}{\sqrt{|P_8 - P_2|}}} \\
Q_{12} &= \mu_5 A_5 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_8 - P_9)}{\sqrt{|P_9 - P_8|}}} & Q_{13} &= \mu_5 A_5 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_9 - P_{11})}{\sqrt{|P_{11} - P_9|}}} \\
Q_{14} &= \mu_5 A_5 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_9 - P_{12})}{\sqrt{|P_9 - P_{12}|}}} & Q_{15} &= \mu_5 A_5 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_{13} - P_9)}{\sqrt{|P_{13} - P_9|}}} \\
Q_{16} &= \mu_2 A_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_4 - P_{13})}{\sqrt{|P_4 - P_{13}|}}} & Q_{17} &= \mu_1 A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_2 - P_{11})}{\sqrt{|P_2 - P_{11}|}}} \\
Q_{18} &= \mu_2 A_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_{11} - P_3)}{\sqrt{|P_{11} - P_3|}}} & Q_{19} &= \mu_4 A_4 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_{12} - P_3)}{\sqrt{|P_{12} - P_3|}}} \\
Q_{20} &= \mu_1 A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{(P_{13} - P_3)}{\sqrt{|P_{13} - P_3|}}} & &
\end{aligned} \tag{4.3}$$

由于每个房间均满足流量平衡，于是有：

$$\begin{aligned}
Q_1 + Q_4 &= Q_5 \\
Q_2 &= Q_6 \\
Q_3 + Q_8 &= Q_7 \\
Q_{11} &= Q_{12} \\
Q_{17} + Q_{13} &= Q_{18} \\
Q_{14} &= Q_{19} \\
Q_{16} &= Q_{15} + Q_{20} \\
Q_9 &= Q_{10} \\
Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_{10} + Q_{12} + Q_{15} &= Q_{13} + Q_{14}
\end{aligned} \tag{4.4}$$

上述方程组中， $P_1 \sim P_4$ 为建筑四个外表面在某一高度下的压力，它与室外风速大小和风向相关，可以直接将各参数代入公式(3.10)进行计算求得。 $P_5 \sim P_{13}$ 为9个房间的室内压力，值未知。 μ_1 和 A_1 、 μ_2 和 A_2 、 μ_3 和 A_3 以及 μ_4 和 A_4 分别为几种尺寸窗户的流量系数和总可开启面积，其中 μ_1 、 μ_2 和 μ_3 可以直接将参数代入公式(3.14)进行计算求得。 μ_5 和 A_5 分别为内门（大小为 $1\text{m} \times 2\text{m}$ ）的流量系数和面积，其中 μ_5 可以直接将参数代入公式(3.17)进行计算求得。 $Q_1 \sim Q_{24}$ 为各个通

风口（外窗和内门）的空气流量，值得求出。

为了求得建筑自然通风的换气量，需要求出室内房间与室外的通风量 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_8 、 Q_9 、 Q_{11} 、 Q_{16} 、 Q_{17} 、 Q_{18} 、 Q_{19} 、 Q_{20} 。

上述非线性方程组一共有 29 个方程，一共也有 29 个未知数（室内压力 $P_5 \sim P_{13}$ 以及 $Q_1 \sim Q_{20}$ ）。为了解出这个方程组，本文采用 C# 编程，利用蒙特卡洛算法对上述非线性方程组进行求解计算。

表 4.3 上海典型气象年各月通风换气量(m^3/s)

层数\月份	1	2	3.4.6.8	5	7	9.10.11.12
1 层	7.23	8.1	6.18	10.78	9.63	9.63
2 层	10.95	11.23	9	14.67	11.87	11.87
3 层	12.86	13.35	11.36	18.1	13.98	13.98
4 层	15.01	15.9	14.24	20.43	16.17	16.17
5 层	16.98	17.32	15.84	22.64	17.63	17.63
6 层	18.45	19.14	17.75	24.02	19.65	19.65
7 层	20.07	20.65	19.92	25.73	21.17	21.17
8 层	21.68	22.05	20.59	27.53	22.78	22.78
9 层	22.57	23.07	21.87	29.4	23.67	23.67
10 层	23.33	23.95	22.57	30.83	24.42	24.42

表 4.3 为计算得到的通风换气量。下面以 9 月为例说明具体计算过程：

(1) 首先根据式 (3.10) 计算各面的风压

北外墙

建筑平面长宽比 $L=1.667$ ，风向角度 $\theta = 0^\circ$ ，窗户中心高度 $h=2m$ ，

$$C_{P1} = 0.039h\cos\theta - 0.028h\sin\theta + 0.07L\cos\theta + 0.006Lh - 0.014 = 0.201$$

$$P_1 = \frac{1}{2}C_{P1}\rho V_{10}^2 = 1.084 \text{ Pa}$$

西外墙

建筑平面长宽比 $L=0.6$ ，风向角度 $\theta = 20^\circ$ ，窗户中心高度 $h=2m$ ，

$$C_{P2} = 0.039h\cos\theta - 0.028h\sin\theta + 0.07L\cos\theta + 0.006Lh - 0.014 = -0.063$$

$$P_2 = \frac{1}{2}C_{P2}\rho V_{10}^2 = -0.339 \text{ Pa}$$

南外墙

建筑平面长宽比 $L=1.667$ ，风向角度 $\theta = 110^\circ$ ，窗户中心高度 $h=2m$ ，

$$C_{P3} = 0.039h\cos\theta - 0.028h\sin\theta + 0.07L\cos\theta + 0.006Lh - 0.014 = -0.189$$

$$P_3 = \frac{1}{2}C_{P3}\rho V_{10}^2 = -1.019 \text{ Pa}$$

东外墙

建筑平面长宽比 $L=0.6$ ，风向角度 $\theta = 160^\circ$ ，窗户中心高度 $h=2\text{m}$ ，

$$C_{P4} = 0.039h\cos\theta - 0.028h\sin\theta + 0.07L\cos\theta + 0.006Lh - 0.014 = 0.113$$

$$P_4 = \frac{1}{2}C_{P4}\rho V_{10}^2 = 0.611 \text{ Pa}$$

(2) 窗户流量系数计算

各外墙上的窗户均为平开窗，且有4种大小尺寸，分别为 $1.2\text{m}\times 2\text{m}$ 、 $2.4\text{m}\times 2\text{m}$ 、 $3.6\text{m}\times 2\text{m}$ 以及 $8.4\text{m}\times 2\text{m}$ （可认为后面三个窗户分别是由2个、3个和7个 $1.2\text{m}\times 2\text{m}$ 组成的）。

根据式(3.14)计算流量系数：

窗户1，窗户高宽比为 $L=1.067$ ，窗户开度 $\theta=30^\circ$ ，窗户面积 $A=2.4\text{m}^2$

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = -0.053\ln(L) + 0.238\ln(\theta) - 0.25 = 0.532$$

(3) 内门流量系数计算

内门大小均为 $1\text{m}\times 2\text{m}$ ，全开，高宽比 $L=2$ ，开度 $\theta=90^\circ$ ，面积 $A=2\text{m}^2$

按照式(3.17)计算得到

$$\mu_5 = -0.044\ln(L) + 0.234\ln(\theta) - 0.331 = 0.694$$

(4) 建筑自然通风流量的计算

利用 C#编程采用蒙特卡洛算法对上述非线性方程组进行计算，可以求得外区房间与室外的通风量：

$$Q_1=1.675 \text{ m}^3/\text{s}, Q_2=1.764 \text{ m}^3/\text{s}, Q_3=1.978 \text{ m}^3/\text{s}, Q_4=-2.06 \text{ m}^3/\text{s}, Q_8=-0.554 \text{ m}^3/\text{s}, \\ Q_9=1.211 \text{ m}^3/\text{s}, Q_{11}=-1.116 \text{ m}^3/\text{s}, Q_{16}=2.223 \text{ m}^3/\text{s}, Q_{17}=0.775 \text{ m}^3/\text{s}, Q_{18}=2.233 \text{ m}^3/\text{s}, \\ Q_{19}=1.876 \text{ m}^3/\text{s}, Q_{20}=1.787 \text{ m}^3/\text{s}。$$

根据实际的流向（流入或流出室内），进入室内的总风量为：

$$Q=1.675+1.764+1.978+1.211+2.223+0.775=9.63 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.2.3.2 自然通风可利用的室外条件计算

一、室内热环境

根据热平衡原理，对于建筑的某一层，有：

$$\rho VC \frac{d(T_i)}{dt} = QC(T_o - T_i) + Q_{内} + Q_{围} \quad (4.5)$$

其中， ρ 为空气密度，取 $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ ； V 为该层建筑体积， m^3 ； C 为空气定压比热，取 $1.01 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ； Q 为进入室内的自然通风量，前一节已经求出， kg/s ； T_o 和 T_i 分别为室外和室内的温度， K ； $Q_{内}$ 为室内热源散热量， $Q_{内}=Q_{人员}+Q_{照明}+Q_{设备}$ ， W ； $Q_{围}$ 为建筑围护结构得热， W ， $Q_{围}=Q_{瞬变传热}+Q_{日射得热}=\sum KA(T_o - T_i)+Q_{日射得热}$ ， K 为围护结构的传热系数， A 为围护结构的面积。

当室内温度变化不大时，忽略建筑蓄热作用，则有：

$$QC(T_o - T_i) + Q_{内} + KA(T_o - T_i) + Q_{日射得热} = 0 \quad (4.6)$$

也即

$$T_i - T_o = \frac{Q_{内} + Q_{日射得热}}{QC + \sum KA} \quad (4.7)$$

$$T_o = T_i - \frac{Q_{内} + Q_{日射得热}}{QC + \sum KA} \quad (4.8)$$

自然通风的最高室外温度:

$$T_{o, \max} = T_{comf, \max} - \frac{Q_{内} + Q_{日射得热}}{QC + \sum KA} \quad (4.9)$$

自然通风的最低室外温度:

$$T_{o, \min} = T_{comf, \min} - \frac{Q_{内} + Q_{日射得热}}{Q_{\min}C + \sum KA} \quad (4.10)$$

式中, $T_{comf, \max}$ 和 $T_{comf, \min}$ 分别为室内舒适温度上、下限值; Q_{\min} 为建筑最小的通风换气量, 根据 ASHRAE 62.1-2004^[60]可以按式 (4.11) 求出,

$$Q_{\min} = R_P P + R_A A_{Floor} \quad (4.11)$$

其中, R_P 为人员所需的新风量, 对办公区域, 取每人 30 m³/h; P 为室内人数, 根据人员密度可以直接求出; R_A 为每平方米地板面积所需的通风量, 取 0.083 m³/(h.m²); A_{Floor} 为室内地板面积。

将各参数代入后^[61], 计算得到上海典型气象年自然通风逐月的室外温度范围见表 4.4 所示。

从该表中可以看出, 在 1、2 和 12 等月份, $T_{o, \min}$ 值为 7.85℃, 当该温度的室外风从窗口进入室内时, 由于温度较低, 容易给人较强的吹冷风感, 此时其实不太适合自然通风。于是本文中参考文献[41]将采用自然通风的室外温度的下限极值设为 12℃, 计算结果低于此值的按 12℃计算, 高于此值的按计算值算。

表 4.4 上海典型气象年自然通风逐月的室外温度范围

月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 层	$T_{o, \max}$	18.46	18.85	18.71	20.49	24	23.04	24.53	23.04	24.53	22.3	19.38	20.48
	$T_{o, \min}$	7.85	7.85	8.68	10.45	12.14	13.65	15.23	14.99	13.54	12.16	10.77	7.85
2 层	$T_{o, \max}$	19.74	19.81	20.01	21.78	24.73	24.33	25.1	24.33	25.1	24.26	22.87	19.95
	$T_{o, \min}$	7.85	7.85	8.68	10.45	12.14	13.65	15.23	14.99	13.54	12.16	10.77	7.85
3 层	$T_{o, \max}$	20.14	20.23	20.66	22.44	25.15	24.99	25.49	24.99	25.49	24.65	23.25	20.34
	$T_{o, \min}$	7.85	7.85	8.68	10.45	12.14	13.65	15.23	14.99	13.54	12.16	10.77	7.85

4层	$T_{o,max}$	20.49	20.61	21.2	22.98	25.36	25.53	25.79	25.53	25.79	24.96	23.56	20.64
	$T_{o,min}$	7.85	7.85	8.68	10.45	12.14	13.65	15.23	14.99	13.54	12.16	10.77	7.85
5层	$T_{o,max}$	20.74	20.78	21.43	23.2	25.52	25.75	25.96	25.75	25.96	25.12	23.73	20.81
	$T_{o,min}$	7.85	7.85	8.68	10.45	12.14	13.65	15.23	14.99	13.54	12.16	10.77	7.85
6层	$T_{o,max}$	20.89	20.96	21.65	23.43	25.6	25.97	26.15	25.97	26.15	25.31	23.92	21
	$T_{o,min}$	7.85	7.85	8.68	10.45	12.14	13.65	15.23	14.99	13.54	12.16	10.77	7.85
7层	$T_{o,max}$	21.04	21.08	21.85	23.63	25.7	26.17	26.27	26.17	26.27	25.43	24.04	21.12
	$T_{o,min}$	7.85	7.85	8.68	10.45	12.14	13.65	15.23	14.99	13.54	12.16	10.77	7.85
8层	$T_{o,max}$	21.16	21.19	21.91	23.68	25.79	26.23	26.38	26.23	26.38	25.55	24.15	21.24
	$T_{o,min}$	7.85	7.85	8.68	10.45	12.14	13.65	15.23	14.99	13.54	12.16	10.77	7.85
9层	$T_{o,max}$	21.22	21.25	22	23.78	25.87	26.32	26.44	26.32	26.44	25.6	24.21	21.29
	$T_{o,min}$	7.85	7.85	8.68	10.45	12.14	13.65	15.23	14.99	13.54	12.16	10.77	7.85
10层	$T_{o,max}$	21.27	21.3	22.05	23.83	25.92	26.37	26.48	26.37	26.48	25.64	24.25	21.34
	$T_{o,min}$	7.85	7.85	8.68	10.45	12.14	13.65	15.23	14.99	13.54	12.16	10.77	7.85

二、室内湿环境

如果室外湿度过大，自然通风可能会导致室内湿度也很大，于是自然通风的条件也要考虑室外空气的湿度。

根据湿平衡原理，对于建筑的某一层，有：

$$\rho VC \frac{d(D_i)}{dt} = Q(D_o - D_i) + D_{内} \quad (4.12)$$

其中， D_i 为室内的绝对湿度，kg(水)/kg(空气)； D_o 为室外空气的绝对湿度，kg(水)/kg(空气)； $D_{内}$ 为室内人员散湿量，kg/s，按式(4.13)取值：

$$D_{内} = \frac{0.001n\phi g}{3600} \quad (4.13)$$

其中， n 为室内人数； ϕ 为群集系数，取 0.96； g 为成年男子小时散湿量，取 109g/h。

当不考虑围护结构的热惰性时，有：

$$Q(D_o - D_i) + D_{内} = 0 \quad (4.14)$$

也即

$$D_o = D_i - \frac{0.001n\phi g/3600}{Q} \quad (4.15)$$

代入数据可以求得各月室外绝对湿度的上限值，如表 4.5。

表 4.5 上海典型气象年自然通风逐月的室外绝对湿度上限值

层数 \	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

月份													
1层	12.93	13.06	13.48	15.19	17.58	17.96	18.56	18.56	18.46	17.51	16.01	13.24	
2层	13.34	13.36	13.92	15.63	17.8	18.4	18.78	18.78	18.64	17.69	16.19	13.41	
3层	13.46	13.49	14.12	15.83	17.91	18.6	18.89	18.89	18.75	17.8	16.3	13.53	
4层	13.56	13.59	14.28	15.99	17.96	18.76	18.94	18.94	18.83	17.88	16.38	13.61	
5层	13.63	13.64	14.34	16.05	18	18.82	18.98	18.98	18.88	17.93	16.43	13.66	
6层	13.68	13.68	14.4	16.11	18.03	18.88	19	19	18.92	17.98	16.48	13.71	
7层	13.71	13.72	14.45	16.16	18.05	18.93	19.03	19.03	18.96	18	16.51	13.74	
8层	13.74	13.74	14.47	16.18	18.07	18.95	19.05	19.05	18.99	18.04	16.54	13.77	
9层	13.75	13.76	14.49	16.2	18.09	18.97	19.07	19.07	19	18.05	16.55	13.78	
10层	13.77	13.77	14.5	16.21	18.1	18.98	19.09	19.09	19.01	18.06	16.56	13.79	

4.2.3.3 自然通风可用小时数计算

根据上一节的条件, 利用 Excel 表格对上海典型年气象数据进行分析处理, 统计得到上海地区全年逐月自然通风可用小时数见表 4.6, 例如, 该建筑的第一层全年自然通风可用小时数共计 3239 小时。但针对本文讨论的办公建筑, 由于该类型建筑人员在室的时间为每天的 8:00~17:00, 统计得到该时间段自然通风的可用小时数一共有 1201 小时。

表 4.6 上海典型气象年自然通风逐月的可用小时数

层数\月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	总计
1层	全天	9	34	111	308	635	403	135	50	533	612	357	52	3239
	工作时段	7	9	67	129	199	87	36	14	144	259	214	36	1201
2层	全天	9	38	128	337	649	522	181	93	580	665	412	48	3662
	工作时段	7	10	84	147	224	147	43	22	167	282	215	38	1386
3层	全天	9	40	130	361	668	542	207	118	585	671	418	52	3801
	工作时段	7	11	86	167	243	159	51	22	172	288	221	42	1469
4层	全天	9	40	130	363	669	601	224	147	590	673	418	52	3916
	工作时段	7	11	86	169	244	202	58	31	176	290	221	42	1537
5层	全天	9	40	130	376	671	616	238	164	598	683	418	52	3995
	工作时段	7	11	86	171	245	208	61	32	198	295	221	42	1574
6层	全天	9	40	130	376	672	616	260	186	630	683	418	52	4072
	工作时段	7	11	86	181	247	214	65	33	214	300	221	42	1621
7层	全天	9	40	130	376	672	642	270	212	631	684	422	54	4142
	工作时段	7	11	86	181	247	236	67	35	215	301	225	44	1655

8 层	全天	9	40	130	376	672	643	274	222	632	683	422	54	4158
	工作时段	7	11	86	181	247	237	68	36	217	301	225	44	1660
9 层	全天	9	40	130	376	672	645	276	229	633	684	422	54	4171
	工作时段	7	11	86	181	247	238	69	37	218	301	225	44	1664
10 层	全天	9	41	130	376	674	647	279	233	635	684	422	54	4184
	工作时段	7	14	86	179	249	239	69	38	219	301	225	44	1670

4.2.4 自然通风利用潜力的影响因素分析

4.2.4.1 室内总得热量的影响

从式(4.8)可知,室内总得热量不同,自然通风的可利用条件将不同,自然通风的利用潜力将会不同。下面以第一层为例,讨论室内总得热量分别取 $10\text{W}/\text{m}^2$ 、 $20\text{W}/\text{m}^2$ 、 $30\text{W}/\text{m}^2$ 、 $40\text{W}/\text{m}^2$ 、 $50\text{W}/\text{m}^2$ 、 $60\text{W}/\text{m}^2$ 等情况下的上海全年自然通风可利用小时数(其他参数的取值同前)。

计算结果见图4.11,从图中可以看出,随着室内总得热量的不断增加,自然通风的可利用小时数不断减小。分析易知,当室内总得热量增加时,为获得相同的室内温度,则需要更大的通风换气量。而此处的最大通风换气量是固定的,因此室内处于舒适范围的小时数必定会减小,从而自然通风的可用小时数也减小。

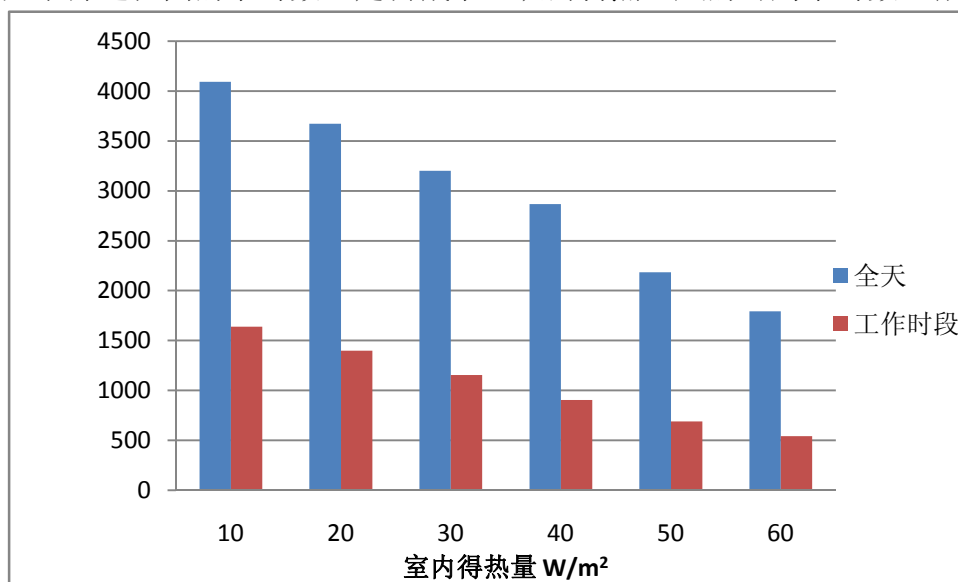


图 4.11 自然通风可用小时数随室内总得热量的变化情况

4.2.4.2 最大通风换气量

在室内总得热量等参数不变的情况下,改变建筑的最大自然通风的通风换气量,本文取换气次数为3、4、5、6、7、8次/ h^{-1} 几种情况进行讨论,计算的可用小时数见图4.12所示。

从图中可以看出，随着建筑自然通风能提供的最大通风换气次数的增加，自然通风的可用小时数不断增加。但当换气次数增到一定值时后，可用小时数的增加幅度越来越小。

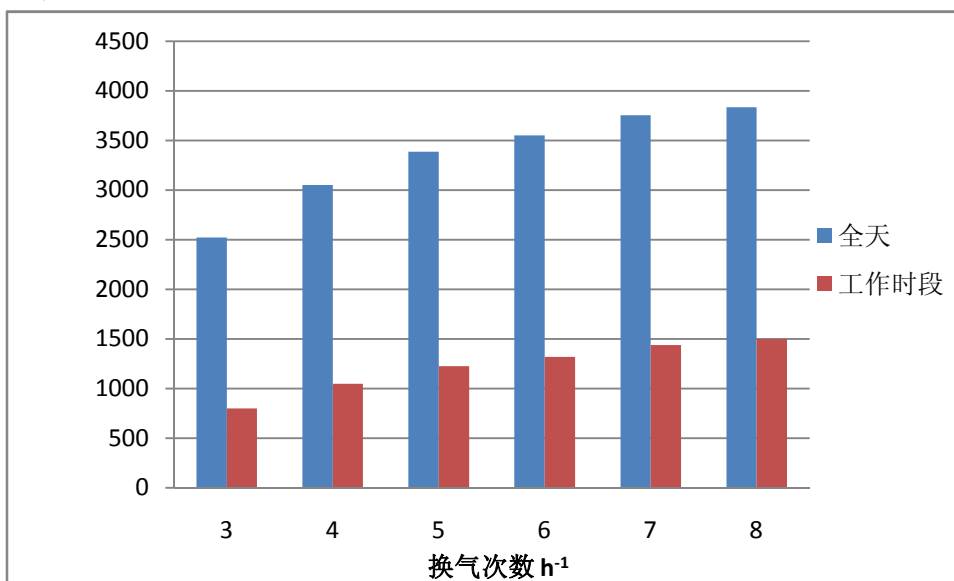


图 4.12 自然通风可用小时数随通风换气次数的变化情况

4.3 自然通风的节能潜力研究

目前，用于建筑能耗模拟的软件有很多，例如 DOE-2, E-Quest, EnergyPlus, Esp-r 等。本文将利用 EnergyPlus 模拟混合通风的节能潜力。本文将比较建筑采用传统的全年机械制冷以及自然通风和机械通风相结合的模式下的能耗，以得到采用自然通风后的能耗节省量。

4.3.1 建筑模型

4.3.1.1 建筑几何模型

采用前一节计算自然通风利用潜力的办公建筑模型，一共十层，层高为 4m，每层建筑平面面积为 $1500m^2$ ($50m \times 30m$ ，长边处于南北方向)，窗墙比为 40%。该建筑分内外区，外区一共有 8 个房间，进深为 5m，内区有一个大的敞开式办公室。如图 4.13 所示。

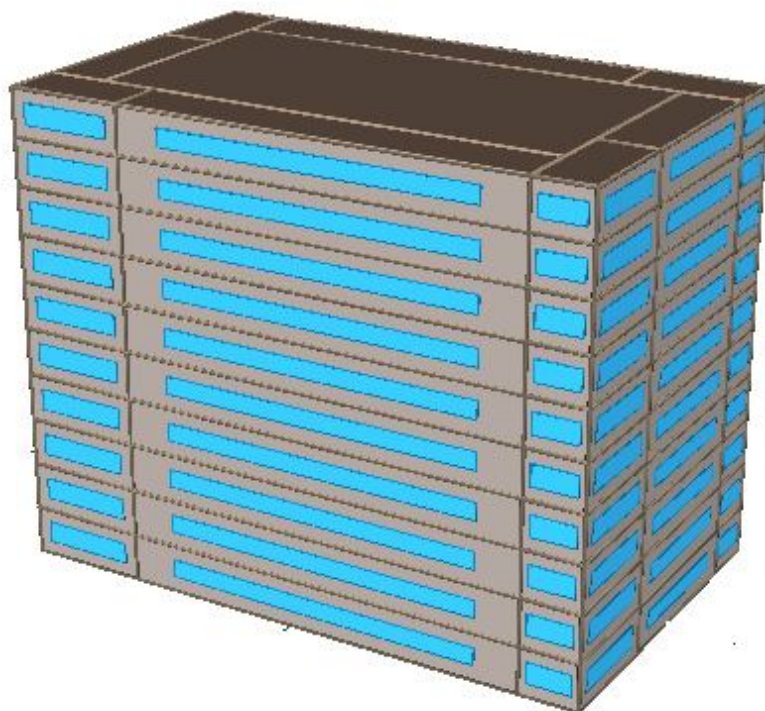


图 4.13 建筑模型图

4.3.1.2 建筑结构热工特性

建筑结构的热工特性均按《公共建筑节能设计标准 GB50189—2005》^[62]取值，如下表 4.7 所示。

表 4.7 建筑模型热工特性

结构	参数	单位	值
外墙	传热系数 U 值	$W/m^2 \cdot K$	1.0
屋顶	传热系数 U 值	$W/m^2 \cdot K$	0.7
外窗	传热系数 U 值	$W/m^2 \cdot K$	3.0
	日射的热系数 SHGC 值	--	0.5

4.3.1.3 室内负荷与运行时间表

室内负荷由照明、设备和人员负荷构成。模型中的室内负荷与时间表参考《公共建筑节能设计标准 GB50189—2005》的相关规定进行设定，如表 4.8~4.9 所示。

表 4.8 室内负荷

制冷室内设定温度	供热室内设定温度	照明	设备	人员
℃	℃	W/m^2	W/m^2	$m^2/人$
26	18	11	20	4

表 4.9 室内负荷时间表

小时	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
照明	0.1	0.5	0.95	0.95	0.8	0.8	0.95	0.95	0.95	0.3
设备	0.1	0.5	0.95	0.95	0.8	0.8	0.95	0.95	0.95	0.3
人员	0.1	0.5	0.95	0.95	0.8	0.8	0.95	0.95	0.95	0.3

4.3.1.4 空调系统

该建筑空调系统为变风量空调系统，各层之间的 AHU 是相互独立控制的，且每层中的内外区房间分别采用两个独立的系统，外区房间有末端再热装置。具体参数见表 4.10。

本文中假定能实现理想控制，也即各层 AHU 在室外气象条件满足自然通风要求时即停止运行，采用自然通风调节室内热环境及空气品质。而当不满足自然通风条件时，又能启动运行 AHU 进行机械通风。各层 AHU 的控制是完全独立的，根据各自的运行时间表进行控制。

未采用自然通风时，也即采用传统的空调模式，AHU 的运行时间为每天的 8:00~17:00。而采用自然通风后，每层的 AHU 运行时间将要减去满足自然通风条件对应的那些时间段。由于每层利用自然通风的室外条件存在一定的差异，因此每层的 AHU 运行时间也不同。统计得到的各层 AHU 在采用自然通风后的运行时间见附录 A 所示。

从该表中可以看出，采用自然通风后，各个月的空调开启规律不相同，有些月几乎每天均要开启空调（例如 1、2、8 等月），有些月几乎不用开启空调（例如 5、10 等月），而有些月根据室外气象条件在空调和自然通风之间切换运行（例如 4、11 等月）。图 4.14~4.16 是第一层 AHU 在 1、4 和 5 月几个典型月的运行时间情况（0 表示空调关闭、1 表示空调开启）。

表 4.10 空调系统参数

系统形式	VAV 系统
供冷室内设定温度 °C	26
供热室内设定温度 °C	18
夏季送风温度 °C	18
冷热源	离心式冷水机组，COP=5.58；电锅炉， $\eta=0.8$
冷冻水泵	二次泵系统：变流量
热水泵	定流量

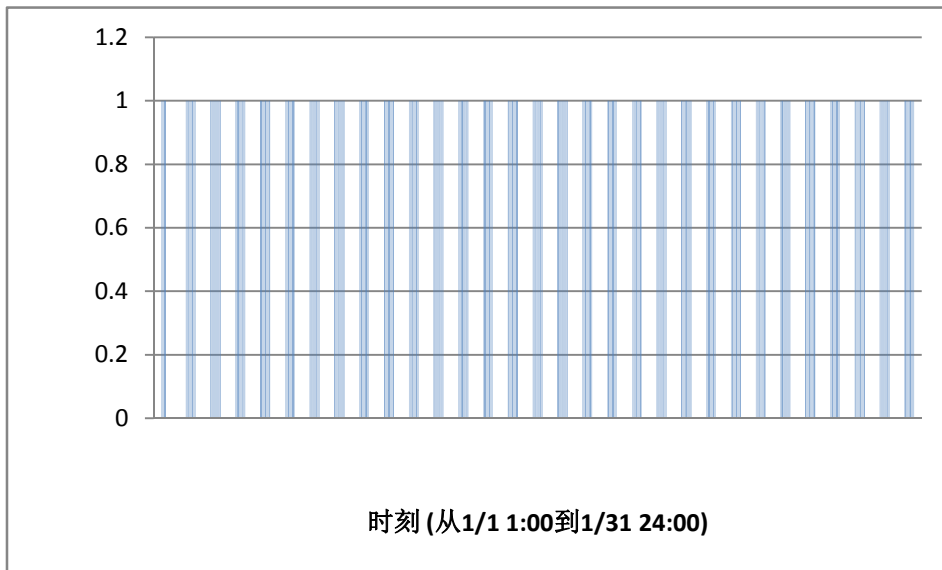


图 4.14 第 1 层 AHU 在 1 月的运行时间

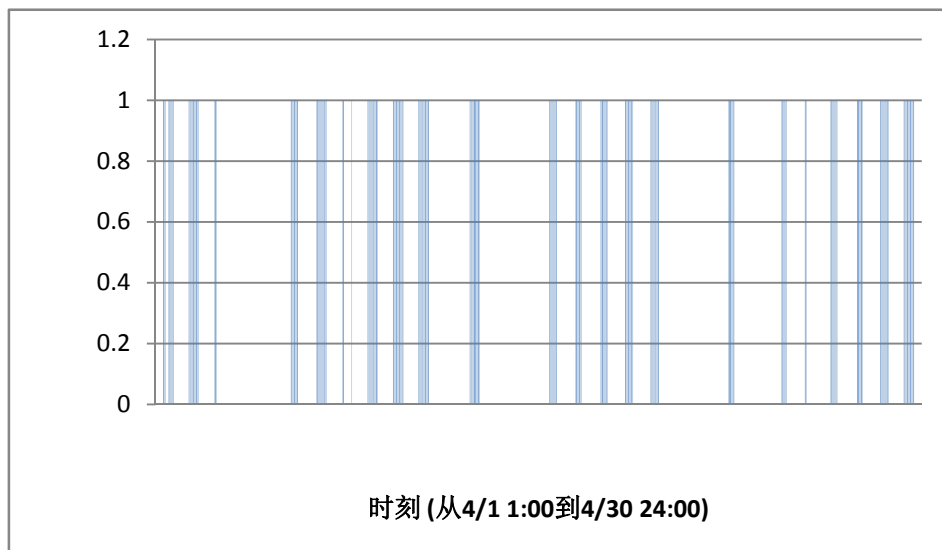


图 4.15 第 1 层 AHU 在 4 月的运行时间

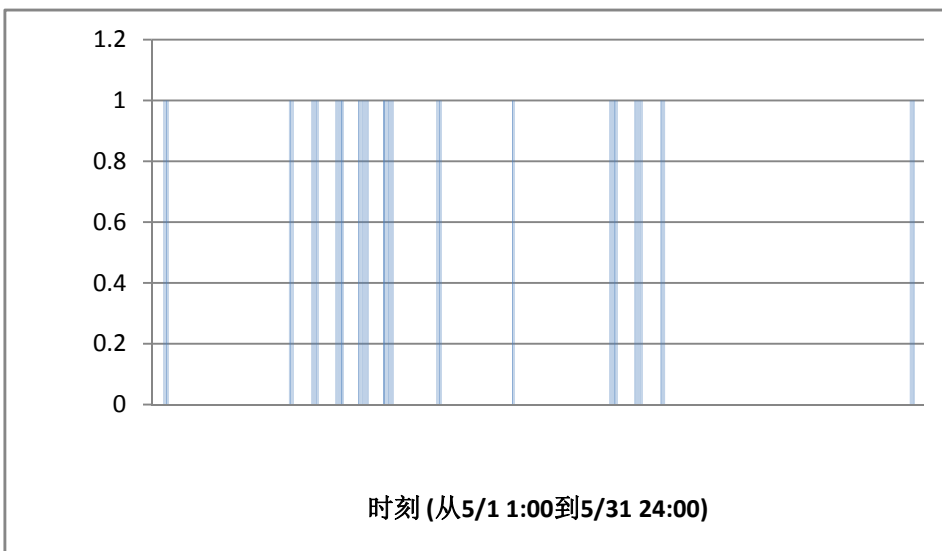


图 4.16 第 1 层 AHU 在 5 月的运行时间

4.3.1.5 新风量与漏风率

新风量取每人 $30\text{m}^3/\text{h}$ ，房间的漏风率按 0.2h^{-1} 的换气次数计算，在空调运行期间，由于室内呈现正压，故漏风率为 0。

4.3.2 能耗结果及分析

两种模式下，全年工作时间内运行的耗电量的对比结果见表 4.11 所示，从表中可以看出，未使用自然通风时，该建筑全年总耗电量为 2289444.4 kWh ，使用自然通风以后，节省了风机和水泵等的运行时间，全年耗电量为 1937222.2 kWh ，同比耗电量的减少了 15.4%。这说明该建筑利用了自然通风后可以节省 15.4% 的能源消耗，具有较大的节能潜力。因此在实际运行中，应根据自然通风的可利用条件，尽量使用自然通风，减少机械通风的运行，减少能耗。

表 4.11 能耗对比表

运行模式	总电耗 kWh	空调能耗 kWh
传统的空调	2289444.4	1019272
自然通风+空调	1937222.2	556161.1
节能率%	15.4	45.3

从表 4.6 可以看出，自然通风可利用小时数有很大一部分位于夜间，因此为充分利用这部分通风潜力，可以根据不同建筑的实际情况利用夜间通风对室内热环境进行处理，让室内在晚间调节处于一个较温和的温度范围，并进行蓄能，这样就可以延后白天空调的开启时间，在提供舒适的热环境同时进一步降低空调能耗。

4.4 本章小结

- (1) 分析了自然通风利用潜力的常见研究方法。
- (2) 讨论了采用自适应模型时自然通风的室内舒适性温湿度范围。
- (3) 以某典型办公建筑为例，分析了在上海典型年气象条件下，该建筑的自然通风换气量情况，并统计得到了该建筑全年自然通风的可用小时数。
- (4) 分析了自然通风利用潜力与室内总得热量、最大通风换气次数的关系。
- (5) 对该典型办公建筑采用自然通风的节能潜力进行了研究。

第5章 结论

当今社会面临的能源压力越来越大,建筑能耗占其中的一个重大的组成部分,因此研究建筑节能相当迫切和重要。自然通风系统相对于传统的机械通风系统,能够在提供舒适的室内热环境的同时,改善室内空气品质和节省建筑运行能耗。

论文分析了建筑自然通风的影响因素,得到了单体建筑表面风压系数与建筑平面面积、建筑长宽比、室外来流风向、垂直高度、水平相对位置的关系,这些因素均对建筑表面风压系数有较大的影响。多元逐步回归得到了相应的计算公式,结果表明,建筑长宽比、室外来流风向、垂直高度等因素的影响更显著,并且风压系数随着高度的增加而增加,随着来流风向角度的增加值先减小后又增大,随着高度的增加而增加。然后讨论了周围其他建筑对其表面风压系数的影响情况,给出了一个修正值,该值随着建筑的增加而减小,随两建筑中心距离以及风向与两建筑中心线的夹角的增大而增大。

分析了建筑三种外窗(平开窗、推拉窗以及悬窗)和内门的流量系数,先讨论了外窗流量系数与窗户面积、高宽比、窗口开度以及窗口两侧温差的关系,结果表明,三种窗户均受这些因素的影响,但规律不尽相同,三种窗户的流量系数也存在较大差异,窗户的流量系数不能按照一个定值进行计算。多元逐步回归得到了相应的计算公式,结果表明,平开窗的流量系数随着窗口高宽比的增大而呈对数规律降低,随窗口开度的增大呈对数规律增大。推拉窗的流量系数随窗口面积呈线性规律增大,随窗口高宽比的增大而呈对数规律增大,随窗口开启率的增大呈线性规律增大。悬窗的流量系数随窗口面积和开度均呈线性规律增大,而随高宽比呈对数增大规律。然后分析了内门的流量系数与门的面积、高宽比以及开度的关系,其中门高宽比和开度影响更加显著。多元逐步回归得到了相应的计算公式,结果表明,其中流量系数与门的高宽比呈线性减小规律、与开度呈对数增加规律。

根据得到的风压系数公式和窗户、门的流量系数可以快速、定量化地计算出相类似建筑的自然通风空气流量。

计算得到上海某典型办公建筑的全年自然通风可用小时数,以第一层为例,全年小时数为3239小时,其中处于工作时间8:00-17:00的小时数为1201小时。该值随室内总得热量的增加而减小,随建筑自然通风的通风换气量的增加为增加。

计算得到上海某典型办公建筑采用自然通风后的节能潜力,该建筑采用自然通风后,全年可以节能15.4%。并分析可以针对不同的建筑,充分利用夜间通风改善室内热环境,这样可以延长不同空调的开启时间,进一步节省能耗。

由于时间与条件限制，论文仍有不少不足之处，有待后续工作继续完善：

1、由于受实验条件的限制，本文的计算公式是采用前人的实验结果进行验证的，该实验中可能存在的很多其他因素无法估计，因此可能会导致其结果与本文结果偏差较大。因此，自己搭建风洞试验台，能对计算结果进行更好的修正和验证。

2、本文是以办公建筑为例研究自然通风潜力的，其他不同的民用建筑的使用特性会存在一定的差异，计算它们的自然通风潜力，分析使用夜间通风的效果，使论文更加全面和具有说服力。

致谢

写到这里，近三年的研究生生涯将要结束了。论文的完成得到了很多人的帮助和指导，在此向所有帮助过我的老师和同学表示感谢。

感谢潘老师和黄老师，论文的完成离不开老师悉心的指导。

感谢师门的兄弟姐妹们，特别感谢黄森师兄对我论文提出的建议和给予的帮助，感谢刘羽岱、田柏秋、蔡丹丹在编程计算方面给予的帮助，感谢王永龙帮我一起去现场进行实验测试。

感谢我的家人，谢谢他们一直以来的支持和鼓励，他们永远是我前进的动力。

最后衷心感谢论文的评阅、答辩老师以及所有关心、帮助过我的同学、朋友。

王 龙

2012.5 于上海

参考文献

- [1] 江亿. 我国建筑能耗状况及有效的节能途径. 暖通空调, 2005, 35(5):30-40.
- [2] 贾庆贤, 赵荣义, 许为全等. 吹风对舒适性影响的主观调查和客观评价. 暖通空调, 2000, 30(3):15-17.
- [3] Kolokotroni M., Watkins R., Santamouris M., et al. Passive Ventilation Cooling in Urban Buildings: an Estimation of Potential Environmental Impact Benefits. AIVC 23rd conference, 2002, 2:531-536.
- [4] O.Zeidler, et al. Investigation of the Impact of Natural Ventilation through Window on the Thermal Comfort. Proc. Clima2000, 7(1):126-127.
- [5] G.H.Gan. Effective Depth of Fresh Air Distribution in Rooms with Single-sided Natural Ventilation. Energy and Building, 2000, 31:65-73.
- [6] Y. Jiang, Qingyan Chen. Buoyancy-driven Single-side Natural Ventilation in Buildings with Large Openings. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003:973-988.
- [7] C. Allocca, Qingyan Chen, L.R.Glicksman. Design Analysis of Single-side Natural Ventilation. Energy and Building, 2003:785-795.
- [8] D.J.Wilson, et al. Gravity Driven Counter Flow through an Open Door in a Sealed Room. Building and Environment, 1999, 25(3):379-388.
- [9] E.Dascalaki, et al. Predicting Single Side Natural Ventilation Rates in Buildings. Solar Energy, 1999, 155(6):327-341.
- [10] G.M. Stavrakakis, M.K.Koukou, M.G.Vrachopoulos, et al. Natural Cross-ventilation in Buildings: Building-scale Experiments, Numerical Simulation and Comfort evaluation. Energy and Building, 2008:1666-1681.
- [11] S.R. Livermore, A.W. Woods. Natural Ventilation of Multiple Story Buildings: The Use of Stacks for Secondary Ventilation. Building and Environment, 2006:1339-1351.
- [12] T.S. Larsen, P. Heiselberg. Single-side Ventilation Driven by Wind Pressure and Temperature Difference. Energy and Building, 2008:1031-1040.
- [13] M.M.Eftekhari, et al. Air Flow Distribution and Around a Single-sided Naturally Ventilation Room. Building and Environment, 2003, 38(4):389-397.
- [14] J.Seifert, Yuguo Li, J.Axley, et al. Calculation of Wind-driven Cross Ventilation in Building with Large Openings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94:925-947.
- [15] M.Z.I. Bangalee, S.Y. Lin, J.J. Miao. Wind Driven Natural Ventilation through Multiple Windows of a Building: A Computational Approach. Energy and Building, 2012, 45:317-325.
- [16] P. Heiselberg, K. Svdt, P.V. Nielsen. Characteristics of Airflow from Open Windows. Building and Environment, 2001, 36:859-869.
- [17] T. Chikamoto, et al. Hybrid Air-conditioning System at Liberty Tower of Meiji University. Presented at the First International One Day Forum on Natural and Hybrid Ventilation, Hybvent Forum'99, 1999.
- [18] J.S. Won, et al. Application of Hybrid Ventilation System Using the Balcony Space in Apartment Housing. Proceeding of Clima 2007 WellBeing Indoors.

- [20] D. Jreijiry, et al. Evaluation of Hybrid Ventilation Control Strategies in Residential Buildings.
- [21] E. Mouriki, et al. Full-scale Study of An Atrium Integrated with A Hybrid Ventilation System.
- [22] K. Niachou, et al. Experimental Performance Investigation of Natural, Mechanical and Hybrid Ventilation in Urban Environment. *Building and Environment*, 2008, 43(8):1373-1382.
- [23] M.H. Kim, J.H.Hwang. Performance Prediction of an Hybrid Ventilation System in A Apartment House. *Energy and Buildings*, 2009, 41(6):579-586.
- [24] Z.Q. Zhai, J.M.Hall, K.Moncef. Assessment of Natural and Hybrid Ventilation Models in Whole-building Energy Simulations. *Energy and Buildings*, 2011, 43(9):2251-2261.
- [25] S. Ezzeldin, et al. Energy and Carbon Emission Savings Due to Hybrid Ventilation of Office Buildings in Arid Climates. *PLEA Conference on Passive and Low Energy Architecture*, 2008.
- [26] F. Cron, et al. Numerical Analysis of Hybrid Ventilation Performance Depending on Climate Characteristics. *International Journal of Ventilation Volume 1 HybVent-hybrid Ventilation Special Edition*.
- [27] C. Szikra. *Hybrid Ventilation Systems*.
- [28] T. Frank, et al. Thermal Comfort Measurements in A Hybrid Ventilated Office Room. *Proceedings of CLIMA 2007 WellBeing Indoors*, 2007.
- [29] 林文. 单开口热压自然通风的实验研究及模拟仿真. 硕士学位论文, 湖南大学, 2008.
- [30] 赵平歌等. 热压、风压共同作用下自然通风效果的 CFD 预测. *能源工程*, 2008:66-69.
- [31] 李红祥. 风压作用下自然通风阻力特性研究. 硕士学位论文, 湖南大学, 2004.
- [32] 隋学敏等. 双热源热压自然通风流场数值模拟研究. *建筑科学*, 2007, 23(10):13-17.
- [33] Yuguo Li. Some Examples of Solution Multiplicity in Natural Ventilation. *Building and Environment*, 2002, 36:851-858.
- [34] 梁传志, 冯国会, 徐硕等. 单体建筑高度对风压作用下自然通风的影响. *沈阳建筑大学学报*, 2007, 23(4):625-629.
- [35] 李安桂, 郝彩霞, 张海平. 太阳能烟囱强化自然通风实验研究. *太阳能学报*, 2009, 30(4):460-464.
- [36] 丁勇, 李百战, 沈艳等. 建筑平面布局和朝向对室内自然通风影响的数值模拟. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(1):90-95.
- [37] 王亮, 谭洪卫, 季亮. 外场风速和建筑空间条件对自然通风的影响. *建筑热能通风空调*, 2009, 28(1):50-53.
- [38] 周军莉, 张国强, 许艳等. 自然通风开口流量系数影响因素探讨. *暖通空调*, 2006, 36(12):42-45.
- [39] 范卫军, 郭春梅, 许延顺等. 天津市某生态办公建筑自然通风设计. *天津城市建设学院学报*, 2009, 15(3):214-217.
- [40] 邓巧林. 具有中庭空间的高层住宅建筑自然通风特性研究. 博士学位论文, 湖南大学, 2007.
- [41] 竞峰, 张旭, 杨洁. 我国部分城市办公建筑自然通风潜力分析. *同济大学学报*, 2008, 36(1):92-96.
- [42] 刘加根, 李晓峰, 张明瑞等. 北京地区办公建筑自然通风全年节能潜力分析. 全国暖通空调专业委员会空调模拟分析学组学术交流会, 2009.
- [43] 李芑, 王菊花, 仇中柱. 办公建筑自然通风节能效果模拟. *制冷空调与电力机械*, 2010, 131(31):59-63.
- [44] 石卉, 高鹏, 杨旭东. 门窗不同开度下自然通风对室内空气品质及能耗的影响. *全国暖通*

空调制冷 2008 年学术年会.

- [45] 闵剑青,徐梓斌.多元通风的室内温度场和空气品质的数值分析.流体机械,2006,34(12):29-32.
- [46] 沈艳,李百战,丁勇.夏热冬冷地区夏季自然通风效果的实测及模拟分析.全国暖通空调制冷 2008 年学术年会.
- [47] 王松华.热压自然通风和机械通风相互增益的多元通风模式研究.硕士学位论文,西安建筑科技大学,2004.
- [48] 王哲斌.教室混合通风的数值模拟和实验研究.北京建筑工程学院,硕士学位论文,2008.
- [49] 张荔.住宅混合通风控制系统关键技术研究.东南大学,硕士学位论文,2008.
- [50] T.Sawachi, K.Narita, N.Kiyota, et al. Wind Pressure and Air Flow in a Full-Scale Building Model under Cross Ventilation. International Journal of Ventilation Volume 2 No 4.
- [51] 喻李葵,阳丽娜,周军莉等.自然通风潜力分析研究进展.制冷空调与电力机械,2004,25(4):18-21.
- [52] Axley J.W, S.J.Emmerich. A Method to Assess the Suitability of a Climate for Natural Ventilation of Commercial Building. Proceedings: Indoor Air 2002, 854-859.
- [53] Ghiaus C, R Belarbi, F Allard. Evaluation of Natural Ventilation Potential by Using Degree-days. International Forum on Renewable Energies FIER'2002 Proceedings.
- [54] Roulet C-A, et al. Potential for Natural Ventilation in Urban Context: an Assessment Method. Proceedings: Indoor Air 2000.
- [55] M.Germano, et al. Multi-criteria Assessment of Natural Ventilation Potential. Solar Energy, 2006, 393-401.
- [56] 张国强,阳丽娜,周军莉等.自然通风潜力评估体系的建立与应用.湖南大学学报,2006,33(1):27-28.
- [57] ASHRAE STANDARD 55-2004. Thermal Environment Conditions for Human Occupancy.
- [58] Fanger, et al. Extension of the PMV Model to Non-air Conditioned Buildings in Warm Climate. Energy and Buildings, 2002, 34(5):533-536.
- [59] G.S.Brager, et al. A Standard for Natural Ventilation. ASHRAE Journal, 2000, 42(10):21-28.
- [60] ASHRAE STANDARD 62.1-2004. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
- [61] 马最良,姚杨.民用建筑空调设计.上海:化学工业出版社,2010.
- [62] GB50189-2005.公共建筑节能设计标准.

附录 A 各层 AHU 运行时间表

层数	AHU 时间表 (1 表示开, 0 表示关)
1	起始时间 1/1 8:00-12:00,1; 其余时间,0; 1/2-2/10 8:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/11 8:00-12:00,1;其余时间,0; 2/12-2/13 10:00-16:00,1;其余时间,0; 2/14 8:00-16:00,1;其余时间,0; 2/15 8:00-9:00 和 16:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/16-3/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/3 8:00-13:00,1;其余时间,0; 3/4-3/8 0; 3/9-3/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/12-3/13 0; 3/14-3/22 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/23-3/24 8:00-12:00,1;其余时间,0; 3/25-3/28 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/29-4/2 8:00-11:00,1;其余时间,0; 4/3-4/8 0; 4/9-4/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 4/12-4/16 0; 4/17-4/20 8:00-17:00,1;其余时间,0; 4/21-4/27 0; 4/28-5/1 8:00-17:00,1; 其余时间,0; 5/2-5/5 0; 5/6-5/10 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/11-5/13 11:00-17:00,1;其余时间,0; 5/14-5/18 0; 5/19-5/21 10:00-17:00,1;其余时间,0; 5/22-5/30 0; 5/31-6/3 11:00-15:00,1;其余时间,0; 6/4-6/6 12:00-17:00,1;其余时间,0; 6/7-6/17 8:00-17:00,1;其余时间,0; 6/18-6/21 0; 6/22-7/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 7/2-7/3 11:00-17:00,1;其余时间,0; 7/4-7/6 0; 7/7-8/24 8:00-17:00,1;其余时间,0; 8/25 0; 8/26-9/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/3-9/4 0; 9/5-9/14 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/15 0; 9/16-9/21 11:00-17:00,1;其余时间,0; 9/22-10/3 0; 10/4-10/7 11:00-17:00,1;其余时间,0; 10/8-11/9 0; 11/10-11/11 12:00-15:00,1;其余时间,0; 11/12-11/16 0; 11/17-11/19 8:00-17:00,1;其余时间,0; 11/20-11/28 0; 11/29-12/4 8:00-17:00,1; 其余时间,0; 12/5-12/10 8:00-10:00,1;其余时间,0; 12/11-12/31 8:00-17:00,1;其余时间,0
2	起始时间 1/1 8:00-12:00,1; 其余时间,0; 1/2-2/10 8:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/11 8:00-12:00,1;其余时间,0; 2/12-2/13 10:00-16:00,1;其余时间,0; 2/14 8:00-16:00,1;其余时间,0; 2/15 8:00-9:00 和 16:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/16-3/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/3 8:00-13:00,1;其余时间,0; 3/4-3/8 0; 3/9-3/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/12-3/13 0; 3/14-3/22 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/23-3/24 8:00-10:00,1;其余时间,0; 3/25-3/28 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/29-4/2 8:00-10:00,1;其余时间,0; 4/3-4/8 0; 4/9-4/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 4/12-4/16 0; 4/17-4/20 11:00-17:00,1; 其余时间,0; 4/21-4/27 0; 4/28-5/1

	<p>8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/2-5/5 0; 5/6-5/10 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/11-5/13 12:00-17:00,1; 其余时间 ,0 ; 5/14-5/18 0 ; 5/19-5/21 12:00-17:00,1;其余时间,0; 5/22-5/30 0; 5/31-6/3 12:00-15:00,1;其余时间,0; 6/4-6/6 13:00-17:00,1;其余时间,0; 6/7-6/17 8:00-17:00,1;其余时间 ,0 ; 6/18-6/21 0 ; 6/22-7/1 8:00-17:00,1; 其余时间 ,0 ; 7/2-7/3 11:00-17:00,1;其余时间,0; 7/4-7/6 0 ; 7/7-8/24 8:00-17:00,1;其余时间,0; 8/25 0; 8/26-9/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/3-9/4 0; 9/5-9/14 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/15 0; 9/16-9/21 13:00-17:00,1;其余时间,0; 9/22-10/3 0 ; 10/4-10/7 12:00-17:00,1;其余时间 ,0 ; 10/8-11/9 0 ; 11/10-11/11 13:00-15:00,1;其余时间,0; 11/12-11/16 0 ; 11/17-11/19 8:00-17:00,1;其余时间,0; 11/20-11/28 0; 11/29-12/4 8:00-17:00,1;其余时间,0; 12/5-12/10 8:00-10:00,1;其余时间,0; 12/11-12/31 8:00-17:00,1; 其余时间,0</p>
<p>3</p>	<p>起始时间 1/1 8:00-12:00,1; 其余时间,0; 1/2-2/10 8:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/11 8:00-12:00,1;其余时间,0; 2/12-2/13 10:00-16:00,1;其余时间,0; 2/14 8:00-16:00,1;其余时间,0; 2/15 8:00-9:00 和 16:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/16-3/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/3 8:00-13:00,1;其余时间,0; 3/4-3/8 0; 3/9-3/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/12-3/13 0; 3/14-3/22 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/23-3/24 8:00-10:00,1;其余时间,0; 3/25-3/28 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/29-4/2 8:00-10:00,1;其余时间,0; 4/3-4/8 0; 4/9-4/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 4/12-4/16 0; 4/17-4/20 13:00-17:00,1; 其余时间 ,0 ; 4/21-4/27 0 ; 4/28-5/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/2-5/5 0; 5/6-5/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/12 12:00-15:00,1;其余时间,0; 5/13-5/18 0; 5/19-5/21 12:00-17:00,1; 其余时间,0; 5/22-5/30 0; 5/31-6/3 12:00-15:00,1;其余时间,0; 6/4-6/6 14:00-17:00,1;其余时间,0; 6/7-6/17 8:00-17:00,1;其余时间,0; 6/18-6/21 0; 6/22-7/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 7/2-7/3 11:00-17:00,1;其余时间,0; 7/4-7/6 0; 7/7-8/24 8:00-17:00,1;其余时间,0; 8/25 0; 8/26-9/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/3-9/4 0; 9/5-9/14 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/15 0; 9/16-9/21 14:00-17:00,1;其余时间,0; 9/22-10/3 0; 10/4-10/7 13:00-17:00,1;其余时间,0; 10/8-11/9 0; 11/10-11/11 13:00-15:00,1;其余时间,0; 11/12-11/16 0; 11/17-11/19 8:00-17:00,1;其余时间,0; 11/20-11/28 0; 11/29-12/4 8:00-17:00,1; 其余时间 ,0 ; 12/5-12/10 8:00-10:00,1;其余时间,0; 12/11-12/31 8:00-17:00,1;其余时间,0</p>

4	<p>起始时间 1/1 8:00-12:00,1; 其余时间,0; 1/2-2/10 8:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/11 8:00-12:00,1;其余时间,0; 2/12-2/13 10:00-16:00,1;其余时间,0; 2/14 8:00-16:00,1;其余时间,0; 2/15 8:00-9:00 和 16:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/16-3/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/3 8:00-13:00,1;其余时间,0; 3/4-3/8 0; 3/9-3/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/12-3/13 0; 3/14-3/22 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/23-3/24 8:00-10:00,1;其余时间,0; 3/25-3/28 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/29-4/2 8:00-10:00,1;其余时间,0; 4/3-4/8 0; 4/9-4/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 4/12-4/16 0; 4/17-4/20 13:00-17:00,1; 其余时间 ,0 ; 4/21-4/27 0 ; 4/28-5/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/2-5/5 0; 5/6-5/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/12 12:00-15:00,1;其余时间,0; 5/13-5/18 0; 5/19-5/21 12:00-17:00,1; 其余时间,0; 5/22-6/4 0; 6/5-6/6 14:00-16:00,1;其余时间,0; 6/7-6/17 11:00-15:00,1;其余时间,0; 6/18-6/21 0; 6/22-7/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 7/2 14:00-17:00,1;其余时间,0; 7/3-7/6 0; 7/7-8/24 8:00-17:00,1; 其余时间,0; 8/25 0; 8/26-9/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/3-9/4 0; 9/5-9/14 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/15 0; 9/16-9/21 15:00-17:00,1;其余时间,0; 9/22-10/3 0; 10/4-10/7 14:00-17:00,1;其余时间,0; 10/8-11/9 0; 11/10-11/11 13:00-15:00,1;其余时间,0; 11/12-11/16 0; 11/17-11/19 8:00-17:00,1;其余时间,0; 11/20-11/28 0; 11/29-12/4 8:00-17:00,1;其余时间,0; 12/5-12/10 8:00-10:00,1;其余时间,0; 12/11-12/31 8:00-17:00,1; 其余时间,0</p>
5	<p>起始时间 1/1 8:00-12:00,1; 其余时间,0; 1/2-2/10 8:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/11 8:00-12:00,1;其余时间,0; 2/12-2/13 10:00-16:00,1;其余时间,0; 2/14 8:00-16:00,1;其余时间,0; 2/15 8:00-9:00 和 16:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/16-3/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/3 8:00-13:00,1;其余时间,0; 3/4-3/8 0; 3/9-3/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/12-3/13 0; 3/14-3/22 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/23-3/24 8:00-10:00,1;其余时间,0; 3/25-3/28 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/29-4/2 8:00-10:00,1;其余时间,0; 4/3-4/8 0; 4/9-4/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 4/12-4/16 0; 4/17-4/20 13:00-17:00,1; 其余时间 ,0 ; 4/21-4/27 0 ; 4/28-5/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/2-5/5 0; 5/6-5/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/12 12:00-15:00,1;其余时间,0; 5/13-5/18 0; 5/19-5/21 12:00-17:00,1; 其余时间,0; 5/22-6/6 0; 6/7-6/17 11:00-15:00,1;其余时间,0; 6/18-6/21 0; 6/22-7/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 7/2 14:00-17:00,1;其余时间,0;</p>

	<p>7/3-7/6 0; 7/7-8/24 8:00-17:00,1; 其余时间,0; 8/25 0; 8/26-9/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/3-9/4 0; 9/5-9/14 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/15-10/3 0; 10/4-10/7 14:00-17:00,1;其余时间,0; 10/8-11/9 0; 11/10-11/11 13:00-15:00,1;其余时间,0; 11/12-11/16 0; 11/17-11/19 8:00-17:00,1;其余时间,0; 11/20-11/28 0; 11/29-12/4 8:00-17:00,1;其余时间,0; 12/5-12/10 8:00-10:00,1;其余时间,0; 12/11-12/31 8:00-17:00,1; 其余时间,0</p>
<p>6</p>	<p>起始时间 1/1 8:00-12:00,1; 其余时间,0; 1/2-2/10 8:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/11 8:00-12:00,1;其余时间,0; 2/12-2/13 10:00-16:00,1;其余时间,0; 2/14 8:00-16:00,1;其余时间,0; 2/15 8:00-9:00 和 16:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/16-3/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/3 8:00-13:00,1;其余时间,0; 3/4-3/8 0; 3/9-3/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/12-3/13 0; 3/14-3/22 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/23-3/24 8:00-10:00,1;其余时间,0; 3/25-3/28 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/29-4/2 8:00-10:00,1;其余时间,0; 4/3-4/8 0; 4/9-4/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 4/12-4/16 0; 4/17-4/20 15:00-17:00,1; 其余时间,0; 4/21-4/27 0; 4/28-5/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/2-5/5 0; 5/6-5/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/12 12:00-15:00,1;其余时间,0; 5/13-5/18 0; 5/19-5/21 12:00-17:00,1; 其余时间,0; 5/22-6/6 0; 6/7-6/17 11:00-15:00,1;其余时间,0; 6/18-6/21 0; 6/22-7/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 7/2 14:00-17:00,1;其余时间,0; 7/3-7/6 0; 7/7-8/24 8:00-17:00,1; 其余时间,0; 8/25 0; 8/26-9/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/3-9/4 0; 9/5-9/14 9:00-17:00,1;其余时间,0; 9/15-10/3 0; 10/4-10/7 14:00-17:00,1;其余时间,0; 10/8-11/9 0; 11/10-11/11 13:00-15:00,1;其余时间,0; 11/12-11/16 0; 11/17-11/19 8:00-17:00,1;其余时间,0; 11/20-11/28 0; 11/29-12/4 8:00-17:00,1;其余时间,0; 12/5-12/10 8:00-10:00,1;其余时间,0; 12/11-12/31 8:00-17:00,1; 其余时间,0</p>
<p>7</p>	<p>起始时间 1/1 8:00-12:00,1; 其余时间,0; 1/2-2/10 8:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/11 8:00-12:00,1;其余时间,0; 2/12-2/13 10:00-16:00,1;其余时间,0; 2/14 8:00-16:00,1;其余时间,0; 2/15 8:00-9:00 和 16:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/16-3/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/3 8:00-13:00,1;其余时间,0; 3/4-3/8 0; 3/9-3/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/12-3/13 0; 3/14-3/22 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/23-3/24 8:00-10:00,1;其余时间,0; 3/25-3/28 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/29-4/2 8:00-10:00,1;其余</p>

	<p>时间,0; 4/3-4/8 0; 4/9-4/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 4/12-4/16 0; 4/17-4/20 15:00-17:00,1; 其余时间 ,0 ; 4/21-4/27 0 ; 4/28-5/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/2-5/5 0; 5/6-5/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/12 12:00-15:00,1;其余时间,0; 5/13-5/18 0; 5/19-5/21 12:00-17:00,1; 其余时间,0; 5/22-6/21 0; 6/22-7/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 7/2 14:00-17:00,1;其余时间,0; 7/3-7/6 0; 7/7-8/24 8:00-17:00,1;其余时 间,0; 8/25 0; 8/26-9/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/3-9/4 0; 9/5-9/14 9:00-17:00,1;其余时间,0; 9/15-10/3 0; 10/4-10/7 14:00-17:00,1;其余时 间,0; 10/8-11/9 0; 11/10-11/11 13:00-15:00,1;其余时间,0; 11/12-11/16 0; 11/17-11/19 8:00-17:00,1;其余时间,0; 11/20-11/28 0; 11/29-12/4 8:00-17:00,1;其余时间 ,0 ; 12/5-12/10 8:00-10:00,1;其余时间 ,0 ; 12/11-12/31 8:00-17:00,1;其余时间,0</p>
8	<p>起始时间 1/1 8:00-12:00,1; 其余时间,0; 1/2-2/10 8:00-17:00,1; 其余 时间,0; 2/11 8:00-12:00,1;其余时间,0; 2/12-2/13 10:00-16:00,1;其余 时间,0; 2/14 8:00-16:00,1;其余时间,0; 2/15 8:00-9:00 和 16:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/16-3/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/3 8:00-13:00,1;其余 时间,0; 3/4-3/8 0; 3/9-3/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/12-3/13 0; 3/14-3/22 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/23-3/24 8:00-10:00,1;其余时 间,0; 3/25-3/28 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/29-4/2 8:00-10:00,1;其余 时间,0; 4/3-4/8 0; 4/9-4/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 4/12-4/16 0; 4/17-4/20 15:00-17:00,1; 其余时间 ,0 ; 4/21-4/27 0 ; 4/28-5/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/2-5/5 0; 5/6-5/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/12 12:00-15:00,1;其余时间,0; 5/13-5/18 0; 5/19-5/21 12:00-17:00,1; 其余时间,0; 5/22-6/21 0; 6/22-7/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 7/2 14:00-17:00,1;其余时间,0; 7/3-7/6 0; 7/7-8/24 8:00-17:00,1;其余时 间,0; 8/25 0; 8/26-9/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/3-9/4 0; 9/5-9/14 9:00-17:00,1;其余时间,0; 9/15-10/3 0; 10/4-10/7 14:00-17:00,1;其余时 间,0; 10/8-11/9 0; 11/10-11/11 13:00-15:00,1;其余时间,0; 11/12-11/16 0; 11/17-11/19 8:00-17:00,1;其余时间,0; 11/20-11/28 0; 11/29-12/4 8:00-17:00,1;其余时间 ,0 ; 12/5-12/10 8:00-10:00,1;其余时间 ,0 ; 12/11-12/31 8:00-17:00,1;其余时间,0</p>
9	<p>起始时间 1/1 8:00-12:00,1; 其余时间,0; 1/2-2/10 8:00-17:00,1; 其余 时间,0; 2/11 8:00-12:00,1;其余时间,0; 2/12-2/13 10:00-16:00,1;其余 时间,0; 2/14 8:00-16:00,1;其余时间,0; 2/15 8:00-9:00 和 16:00-17:00,1;</p>

	<p>其余时间,0; 2/16-3/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/3 8:00-13:00,1;其余时间,0; 3/4-3/8 0; 3/9-3/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/12-3/13 0; 3/14-3/22 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/23-3/24 8:00-10:00,1;其余时间,0; 3/25-3/28 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/29-4/2 8:00-10:00,1;其余时间,0; 4/3-4/8 0; 4/9-4/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 4/12-4/16 0; 4/17-4/20 15:00-17:00,1; 其余时间 ,0 ; 4/21-4/27 0 ; 4/28-5/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/2-5/5 0; 5/6-5/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/12 12:00-15:00,1;其余时间,0; 5/13-5/18 0; 5/19-5/21 12:00-17:00,1; 其余时间,0; 5/22-6/21 0; 6/22-7/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 7/2 14:00-17:00,1;其余时间,0; 7/3-7/6 0; 7/7-8/24 8:00-17:00,1;其余时间,0; 8/25 0; 8/26-9/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/3-9/4 0; 9/5-9/14 9:00-17:00,1;其余时间,0; 9/15-10/3 0; 10/4-10/7 14:00-17:00,1;其余时间,0; 10/8-11/9 0; 11/10-11/11 13:00-15:00,1;其余时间,0; 11/12-11/16 0; 11/17-11/19 8:00-17:00,1;其余时间,0; 11/20-11/28 0; 11/29-12/4 8:00-17:00,1;其余时间,0; 12/5-12/10 8:00-10:00,1;其余时间,0; 12/11-12/31 8:00-17:00,1;其余时间,0</p>
10	<p>起始时间 1/1 8:00-12:00,1; 其余时间,0; 1/2-2/10 8:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/11 8:00-12:00,1;其余时间,0; 2/12-2/13 10:00-16:00,1;其余时间,0; 2/14 8:00-16:00,1;其余时间,0; 2/15 8:00-9:00 和 16:00-17:00,1; 其余时间,0; 2/16-3/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/3 8:00-13:00,1;其余时间,0; 3/4-3/8 0; 3/9-3/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/12-3/13 0; 3/14-3/22 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/23-3/24 8:00-10:00,1;其余时间,0; 3/25-3/28 8:00-17:00,1;其余时间,0; 3/29-4/2 8:00-10:00,1;其余时间,0; 4/3-4/8 0; 4/9-4/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 4/12-4/16 0; 4/17-4/20 15:00-17:00,1; 其余时间 ,0 ; 4/21-4/27 0 ; 4/28-5/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/2-5/5 0; 5/6-5/11 8:00-17:00,1;其余时间,0; 5/12 12:00-15:00,1;其余时间,0; 5/13-5/18 0; 5/19-5/21 12:00-17:00,1; 其余时间,0; 5/22-6/21 0; 6/22-7/1 8:00-17:00,1;其余时间,0; 7/2 14:00-17:00,1;其余时间,0; 7/3-7/6 0; 7/7-8/24 8:00-17:00,1;其余时间,0; 8/25 0; 8/26-9/2 8:00-17:00,1;其余时间,0; 9/3-9/4 0; 9/5-9/14 9:00-17:00,1;其余时间,0; 9/15-10/3 0; 10/4-10/7 14:00-17:00,1;其余时间,0; 10/8-11/9 0; 11/10-11/11 13:00-15:00,1;其余时间,0; 11/12-11/16 0; 11/17-11/19 8:00-17:00,1;其余时间,0; 11/20-11/28 0; 11/29-12/4 8:00-17:00,1;其余时间,0; 12/5-12/10 8:00-10:00,1;其余时间,0; 12/11-12/31 8:00-17:00,1;其余时间,0</p>

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

王龙, 男, 1988年12月生

2009年7月毕业于合肥工业大学建筑环境与设备工程专业, 获学士学位

2009年9月进入同济大学供热、供燃气、通风及空调工程专业读硕士研究生

已发表论文:

[1] 王龙, 潘毅群, 黄治钟. 建筑外窗自然通风流量系数的影响因素分析. 建筑节能, 2012.