

自然通风技术研究进展

科技综述

湖南大学 段双平[☆] 张国强 彭建国 周军莉

摘要 介绍了自然通风的研究模型、研究方法和研究工具,分析了建筑结构对自然通风的影响,给出了自然通风的整体设计步骤,指出了自然通风研究中存在的问题。

关键词 自然通风 模型 方法 设计

Development in research of natural ventilation

By Duan Shaoping, Zhang Guoqiang, Peng Jianguo and Zhou Junli

Abstract Presents the research models, methods and tools of natural ventilation. Analyses the influence of building structure on natural ventilation. Describes the whole design procedure. Points out the present problems of natural ventilation.

Keywords natural ventilation, model, method, design

Hunan University, Changsha, China

①

0 引言

可持续发展是新世纪人类社会发展的主题。建筑既是全球能源和资源消耗的大户,又是人类生活环境的主要营造者和影响者,因此,建筑的可持续发展在全球的可持续发展中占有重要地位。在空调技术得到高速发展的100年里,人类历史上长期赖以调节室内环境的自然通风被机械通风取代。在节约能源、保持良好的室内空气品质双重压力下,全球科学家,特别是欧洲科学家,开始重新审视自然通风技术。现代人类对自然通风的利用已经不同于以前开窗、开门通风,而是如何充分利用室内外条件,如建筑周围环境、建筑构造(如中庭)、太阳辐射、气候、室内热源、机械通风等,来组织和诱导自然通风。

本文对自然通风的模拟模型、研究方法与工具及其设计问题的研究进行了回顾,并对亟需解决的一些难题进行阐述,希望能对我国自然通风的深入研究有一定的参考。

1 自然通风研究模拟模型

1.1 两风口单区建筑

香港学者李玉国基于流体静力学的孔口理论对开有两个小风口(风口的高度相对房间的高度较小)的单区建筑的各种自然通风情况进行了系统的理论分析和研究^[1~3]。根据作用力类型,自然通风可分为:风压单独作用、热压单独作用、风压与热压共同作用、风机辅助式的自然通风。

1.1.1 风压单独作用

当风压的作用远大于热压作用,如当室外风速很大时,只可考虑风压作用。建筑迎风面和背风面的风压差促使空

气从处于迎风面的风口进入室内而从背风面的风口排出,从而形成风力驱动的自然通风。通风量可用下式计算:

$$q_w = (C_d A)^* \sqrt{\frac{2\Delta p_w}{\rho}}$$

$$\Delta p_w = \frac{1}{2} \rho (C_{p1} v_1^2 - C_{p2} v_2^2)$$

式中 q_w 为自然通风量; C_d 为通风系数; A 为风口面积; $(C_d A)^*$ 为风口的有效面积; Δp_w 为风压; ρ 为空气密度; C_{p1} 、 C_{p2} 分别为迎风面和背风面的风压系数; v_1 、 v_2 分别为迎风 and 背风风口的风速。

风压系数(C_p)的确定是风压计算的难点,它与建筑形状、建筑围护结构的空位置、周围环境及风向有关。目前用来确定风压系数的方法主要有风洞实验法和 CFD 模拟算法,但其效果均不够理想^[3]。

风压系数随高度变化,对目前研究的小风口通风问题,一般取风口各点风压系数的平均值。通常,现代建筑的窗墙比越来越大,小风口假设已经失效,这种计算会带来较大误差。

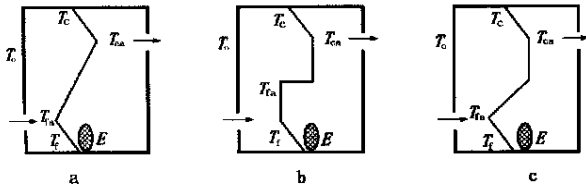
1.1.2 热压单独作用

当风压作用比热压作用弱,例如当室外风速很小而室

① ☆ 段双平,女,1974年4月生,在读硕士研究生
410082 湖南省长沙市岳麓山湖南大学 18 舍 506-3
E-mail: sduan@chinahv.ac.cn
收稿日期:2003-05-09
修回日期:2004-01-12

内外温差很大时,可只考虑热压作用。当室内外空气存在密度差时,密度小的空气向上运动,密度大的空气向下运动而形成的自然通风,称热压作用的自然通风。在建筑内,由人体、灯光、设备、太阳辐射等产生大量的热,当室外空气温度低于室内温度时,可以利用热压的抽吸作用或烟囱效应将室外空气引入室内。

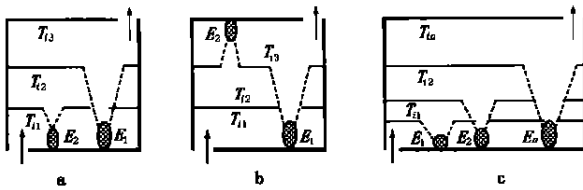
热压单独作用的自然通风需考虑室内的温度分层情况。热源的强度及分布情况影响温度分层。文献[4~5]建立了3个热分层模型,即线性分布模型、两层分布模型和混合模型,分别如图1a、b、c所示。



T_s 室外空气温度 T_c 天花板温度 T_{ca} 靠近天花板处空气温度
 T_{ca} 靠近地面处空气温度 T_f 地板温度 E 热源强度

图1 热分层模型

由于室内热源分布情况复杂,从而给通风量的计算和室内气流分布的分析带来困难。在理论上,我们只能从简单的热源分布情况分析。文献[1~2, 6~7]分别就单一点热源、同向或反向放置两强度不同的点热源和 n 个同向放置的强度不同的点热源的通风(如图2所示)进行了详细分析。



T_{ij} 热源强度 E_i 引起的室内第 j 热分层的空气温度

图2 3种点热源分布情况

通常在实际中遇到最多的是面热源,如灯光、发热设备、表面温度比室内温度高的墙体及辐射地板等。文献[8~10]采用实验和分析方法分别建立了存在垂直分布和水平分布的面热源的通风量计算模型,如图3所示。

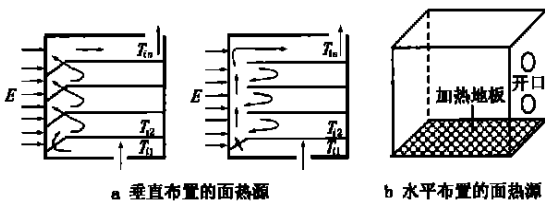
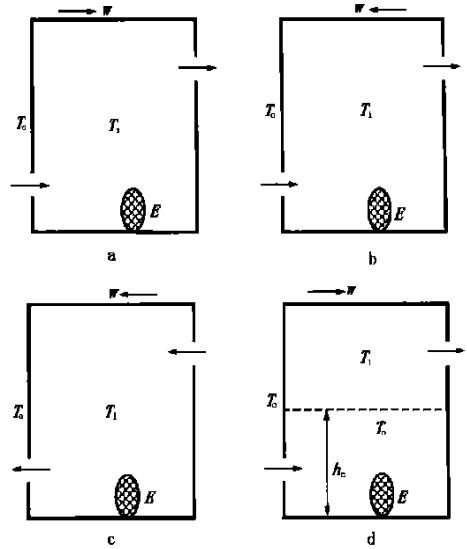


图3 面热源分布情况

1.1.3 风压与热压共同作用

目前的研究主要考虑单一点热源存在的情况^[1~2]。图4是风压与热压共同作用的两风口建筑的自然通风流动示意图,其中图4d为热分层情况。从图5可看出,无量纲



T_s 室内空气温度 w 屋顶处风速
 h_c 净区高度(即出现热分层时室内温度等于室外温度的区域高度)

图4 风压与热压共同作用的两风口建筑的自然通风流动示意图

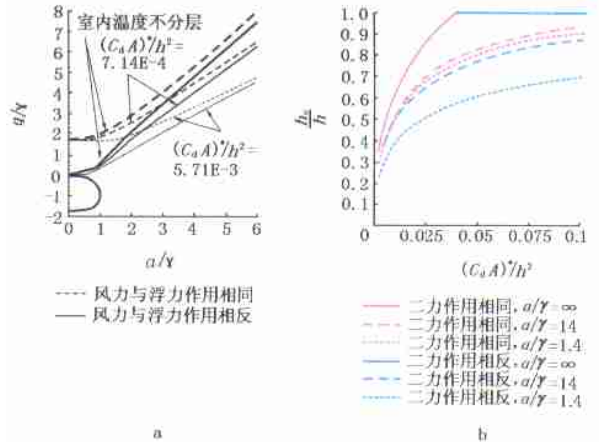


图5 风压与热压共同作用的两风口建筑的自然通风

自然通风量(q/γ)和无量纲净区高度(h_d/h)是风力参数 γ ($\gamma = \frac{1}{\sqrt{3}}(C_d A)^* \sqrt{\frac{\Delta P_w}{\rho}}$),热浮力参数 α ($\alpha = ((C_d A)^*)^{\frac{2}{3}} (Bh)^{\frac{1}{3}}$),其中 B 为热浮力通量, h 为单区建筑中顶部风口与底部风口中心线间的高度差)及无量纲风口面积 ($(C_d A)^*/h^2$)的函数。当风压与热压作用相同时,存在唯一的稳态解;而当风压与热压作用相反时,存在两个稳态解。李玉国等人对风压与热压共同作用的自然通风的多解问题作了深入研究,并把这个问题扩展到了两区建筑的自然通风问题^[11]。

1.1.4 风机辅助式自然通风

自然通风效果受风压与热压的限制,当风压与热压很

小时,需要开动风机以弥补自然通风量的不足。由于风机运行后,室内的压力场将发生改变,所以会出现多种气流流动模式^[1~2],图6是分别考虑热压与送风机或排风机共同作用时的两种情况。

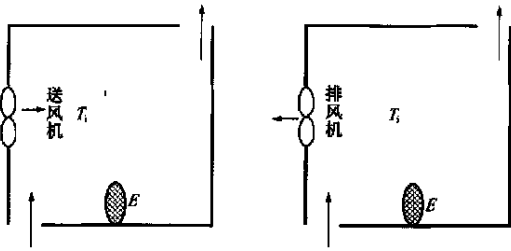


图6 热压与送风机或排风机共同作用的通风示意图

1.2 三风口单区建筑

三风口建筑的自然通风更加复杂,如图7所示。文献

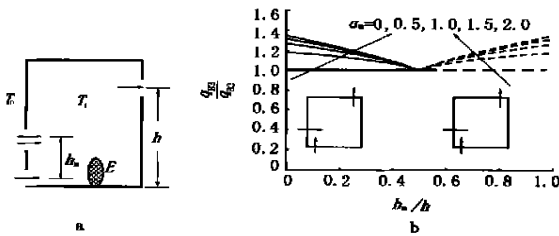


图7 热压单独作用的三风口单区建筑的自然通风

[1]对热压单独作用下的自然通风进行了研究,得出结论:当底部风口与顶部风口面积相等时,无量纲总通风量(q_{B2}/q_{B1})(q_{B2} 、 q_{B1} 分别为热压单独作用时的两风口、三风口建筑的自然通风量)是中间风口的无量纲高度(h_m/h)(h_m 为单区建筑中中间风口与底部风口中心线间的高度差)与无量纲面积(α_m)(α_m 为中间风口的面积率,等于中间风口的有效风口面积(C_{dA})_m^{*}与底部风口的有效风口面积(C_{dA})_b^{*}之比)的函数。

1.3 两区建筑

图8为每区有两小风口,考虑热压与风压共同驱动的自然通风示意图。文献[11]中假设不考虑温度分层,两区间的隔墙是绝热的(即两区间除通过风口进行热传递之外,不通过隔墙传热),通过理论推导出热压与风压同向作用或反向作用的通风量计算式,经过分析发现热压与风压作用相反时,存在多种流动和多解问题,流动变得很复杂。文献[5]还用软件MIX3.0预测了热分层情况下的通风量。

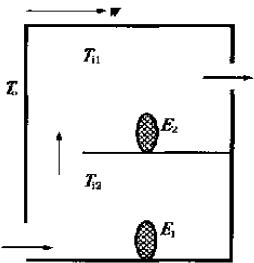


图8 热压与风压共同作用的两区建筑自然通风示意图

1.4 大风口建筑

许多建筑,尤其是商业建筑,窗墙比很大,窗户、门、楼梯间等都属于大风口。通过大风口的气流通常为双向流,冷空气由风口的下部流入房间,而热空气则由风口的上部

流出房间,因此研究和设计变得更加复杂,通风量的理论计算模型难以建立。目前的研究主要是采用CFD、多区模拟和实验的方法。多区模拟是一种快捷方便的求解大风口自然通风问题的方法。文献[12]把大风口看成多个小风口的串联来处理,提出了外压和内压的概念,根据风口所在的位置,分别得出了基于压差的风量计算模型,并结合热平衡方程开发出多区多风口的自然通风计算程序MIX(multi-cell infiltration and exfiltration)。另外比较常用的求解大风口问题的软件还有COMIS(conjunction of multizone infiltration specialists)软件^[13]。

2 自然通风研究方法及工具

2.1 研究方法

2.1.1 实验法

2.1.1.1 风洞模型实验法

风洞实验的原理是相似性原理,它应用于自然通风中主要是模拟建筑表面及建筑周围的压力场和速度场,以及确定风压系数,预测自然通风性能^[14]。

2.1.1.2 示踪气体测量法

示踪气体测量法可以预测建筑通风量和气流分布。有两种测量方法:定浓度法和衰减法。所谓定浓度法,就是在测试期间,保持所有测试房间的示踪气体浓度不变,而改变示踪气体注射量,它用来处理驱动力发生改变的通风问题,如渗透问题和自然通风。而衰减法指向测试房间注入一定量的示踪气体,随着示踪气体在测试房间的扩散,示踪气体的浓度呈衰减趋势^[15~16]。在自然通风中可用该方法来预测自然通风量。如文献[17]中用示踪气体N₂O、SF₆、N₂测量贯流通风的通风量。

2.1.1.3 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(the gas modeling system,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(the water modeling system,以水作为介质,有固定的加热装置);盐水模拟法(the brine-water modeling,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(a fine bubble technique,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),见图9a。其缺点为:不能模拟建筑热特性对自然通风的影响^[18]。对风压与热压共同驱动的自然通风的实验模拟较复杂,可以通过改进这4种模拟法或综合这4种模拟法使之能模拟二力共同驱动的自然通风。图9b是将盐水模拟技术加以改进而得出的一种模拟风压辅助热压式自然通风。装有盐水的水箱悬挂在装有纯净水的大水箱中,盐水箱上部接一直径很小的管道与一补水箱相连,其两侧开有许多孔口且可通过调节其上的插栓来调节每个孔口面积。用小水箱与大水箱间的盐水浓度差以模拟热压,通过泵来调节盐水箱的水流出速度及盐水箱两侧的压差(可由压差计测量)以模拟风

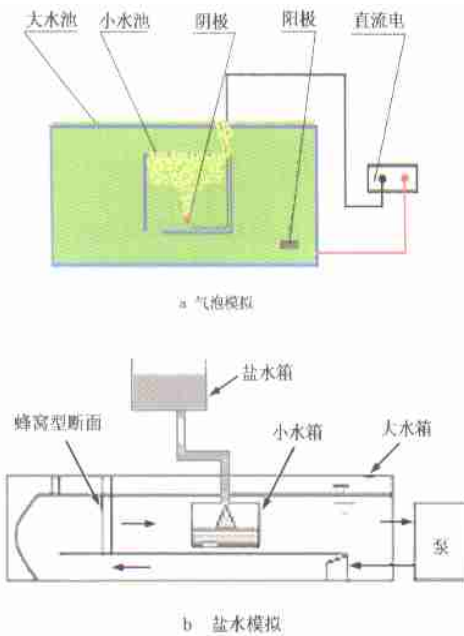


图9 自然通风模拟实验装置

2.1.2 数值模拟法

2.1.2.1 CFD

CFD方法应用相当广泛,该方法就是将房间划分为小的控制体,把控制空气流动的连续的微分方程组通过有限差分或有限元方法离散为非连续的代数方程组,并结合实际的边界条件在计算机上求解离散所得的代数方程组,只要划分的控制体足够小,就可认为离散区域的离散值代表整个房间内空气分布情况。由于分割的控制体可以很小,所以它可详细描述流场,但由于求解的问题往往是非线性的,需进行多次迭代,故较耗时。它可与建筑能源模拟软件如 EnergyPlus 进行耦合^[20]。

2.1.2.2 多区模型方法 (multi-zone model 或 single flow element model)

假设每个房间的特征参数分布均匀,则可将建筑的一个房间看作一个节点,通过窗户、门、缝隙等与其他房间连接。其优点是简单,可以预测通过整个建筑的风量,但不能提供房间的温度与气流分布信息。该方法是利用伯努利方程求解开口两侧的压差,根据压差与流量的关系就可求出流量^[21]。它只适用于预测每个房间参数分布较均匀的多区建筑的通风量,不适合预测建筑内的气流分布。图10为一个多区气流模型网络结构,节点代表房间,直线代表气流流动路径,小长方形代表气流经过窗户、缝隙、门等受到的流动阻力。

2.1.2.3 区域模型方法 (zonal model 或 multi-flow elements model)

许多文献中介绍的区域模型方法与多区模型方法相同。实际上,多区模型方法过分简化了系统,产生很大误差,尤其在处理热压驱动的自然通风等室内温度产生明显分层的情况时误差很大。文献[22~23]中介绍的区域模型

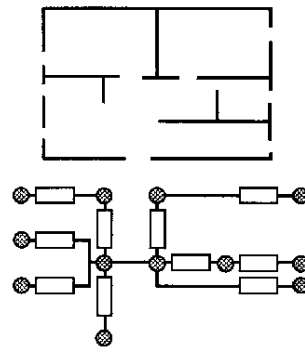


图10 多区模型方法示意图

方法的基本思想是:将房间划分为一些有限的宏观区域,认为每个区域的相关参数如温度、浓度等相等,而区域间存在热质交换;建立质量和能量守恒方程,并充分考虑区域间压差和流动的关系来研究房间内的温度分布及流动情况。可见该方法比多区模型方法复杂和精确,但比 CFD 简单。

它可嵌套在多区建筑能源和气流分析软件,如 SPARK, COMIS 和 CONTAM 中预测气流及温度分布^[22,24]。如文献[23]采用区域模型方法预测了房间中的自然通风量和温度分布情况。

2.2 设计与研究工具

在自然通风的研究与设计过程中,需借助于现有的分析流体流动和能量的一些软件,并应开发出适用于自然通风的软件。目前可应用于分析自然通风系统的通风特性和热特性的常见软件分别有: CONTAM W, COMIS, Lesocool, NatVent, Fluent, Flovent, MIX, CHEMIX, BREEZE 与 NewQUICK, TRNSYS, BLAST, EnergyPlus, DOE-2, ESP-r 等^[25~28]。

由于每个软件其本身的局限性及自然通风与热传递的相互影响,为了全面地预测建筑热特性和自然通风之间的关系,有必要将通风模拟软件与热模拟软件进行耦合。

常见的耦合方法有四种^[29]。

2.2.1 顺序耦合 (sequential coupling)

给定一室内温度由流动模型方程计算通风量,然后将计算出的流量代入热模型方程中计算温度。计算出的温度并不代入流动模型方程中,而是就此终止计算。该方法会产生很大误差。

2.2.2 ping-pong 耦合

在第一个时间步长内,给定一初始室内温度,由流动模型方程计算出通风量,然后将计算结果代入热模型方程中,计算出的温度再代入流动模型方程中,计算出第二个时间步长的通风量,依次类推。该方法计算速度快,但产生的误差较大。如图11a所示。

2.2.3 onions 耦合

与 ping-pong 方法不同,它是在每个时间步长内对两个模型方程进行多次迭代直到得出的结果收敛为止,然后才转入下一个时间步长再进行迭代。该方法计算速度慢,但产生的误差较小。如图11b所示。

2.2.4 直接耦合

将流动模型方程和热模型方程合并成热传递过程控制方程组后同时解出两个方程。该方法比前3种方法更精确,但需更多的时间。

文献[30]中介绍了两种耦合方法:静态耦合和动态耦

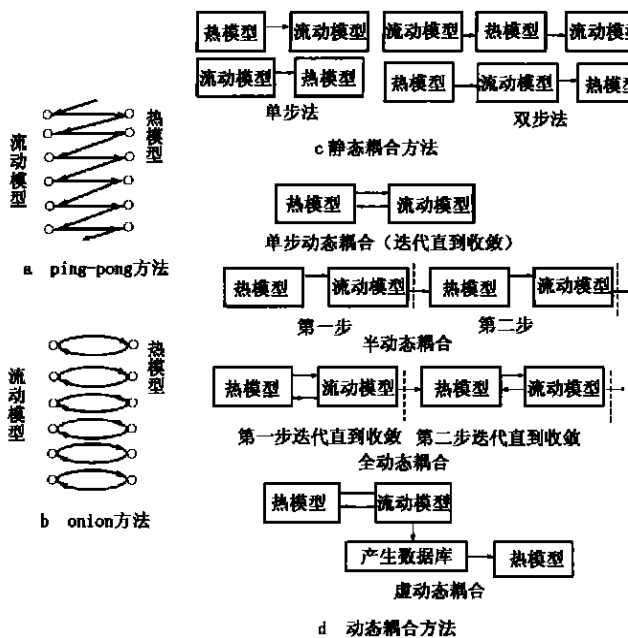


图 11 常见的耦合方法

合,其耦合流程如图 11c、d 所示。

3 自然通风设计问题

3.1 建筑结构设计与自然通风

自然通风效果与建筑结构(窗、门、墙体等)有着密切关系。我们在建筑设计时应考虑充分利用自然通风。

3.1.1 双层玻璃幕墙(double-skin facade)

在欧洲,采用玻璃幕墙的建筑很流行,为减少夏季空调的冷负荷,需要遮阳设备。研究表明,采用外遮阳设备比内遮阳设备节能效果更佳,但外遮阳设备投资大且影响美观。于是发展了双层玻璃幕墙,双层玻璃之间留有较大的空间,常被称为“会呼吸的皮肤”。有时可将房间的窗户开向墙穴。如图 12 所示。在冬季,双层玻璃间层形成阳光温室。

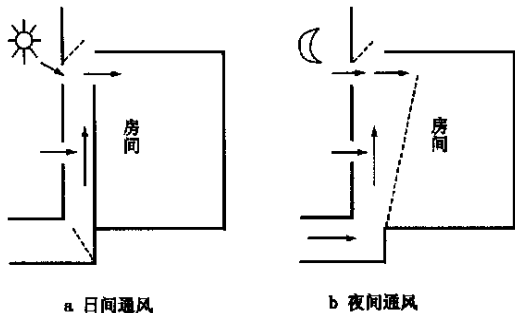


图 12 双层玻璃幕墙

提高建筑围护结构表面温度;在夏季,可利用烟囱效应在间层内通风。玻璃幕墙间层内气流和温度分布受双层墙及建筑的几何、热物理、光和空气动力特性等因素的影响。CFD 和 network 方法的模拟结果表明,该结构可大大减少建筑冷负荷,提高自然通风效率^[31~33]。

双层玻璃幕墙具有如下优点:避免开窗带来的对室内气候的干扰;使室内免受室外交通噪声的干扰;夜间可安全

通风。然而由于大量使用玻璃,夏季会增加太阳辐射得热而使夹层内的温度很高,引起能耗增加,甚至导致办公室过热。所以为减少其带来的不利影响,内层可采用浅色玻璃,间层内设置窗檐,但应注意窗檐、风口、窗户的合理安装^[34]。

3.1.2 窗户

大多数情况下,自然通风系统中以窗户来充当风口,窗户的形式、面积大小及安装位置影响通风效率、室内空气组织和室内热舒适。

Per Heiselberg 等人研究了不同类型窗户的通风特性,认为对于单侧自然通风、贯流通风或热压驱动的自然通风来说,在冬季最好选择底悬式窗户,在夏季最好选择侧悬式窗户。窗户的通风系数 C_d 随着开口面积、窗户类型和室内外温差的变化而变化,不能认为是常数,仅当开口面积较大时,通风系数才近似等于 0.6^[35]。

文献[36]对单区和两区建筑的热压驱动的单侧通风,采用 CFD 方法,在不同的室内外温差、安装高度的情况下,得出了窗户处垂直温度分布、通风量及室内温度随时间的变化关系。

3.1.3 中庭

高层建筑可利用中庭的热压作用实现自然通风,德国法兰克福商业银行总部大楼便是成功的一例^[37]。有中庭的建筑越来越多,但大多为封闭式,设计的目的是采光。

3.1.4 风塔

如图 13 所示,由垂直竖井和几个风口组成,在房间的排风口末端安装太阳能空气加热器以对从风塔顶部进入的空气产生抽吸作用。该系统类似于风管供风系统^[38]。

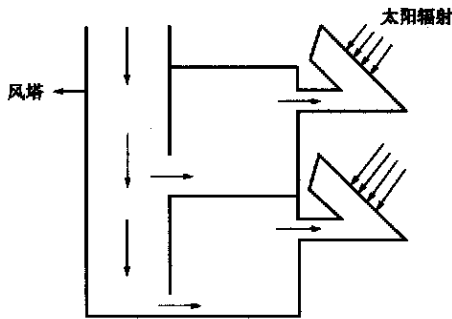


图 13 风塔的自然通风示意图

3.1.5 屋顶

屋顶的形状影响室外风压,从而影响自然通风效果。可采用翼形屋顶以便形成高压区和低压区。文献[39]用 CFD 方法和实验方法研究了自然通风建筑中,屋顶形状和屋顶高度对自然通风情况下的室内空气分布和室内空气流速的影响。

3.2 自然通风整体设计

自然通风与机械通风不同,它受气候、建筑周围的微环境、建筑结构及建筑内部热源分布情况的强烈影响,所以它的设计是与气候、环境、建筑融为一体的整体设计。其整体

设计步骤如下。

3.2.1 确定气候的自然通风潜力

自然通风潜力(NVP), 指仅依靠自然通风就可确保可接受的室内空气品质和室内热舒适性的潜力。根据建筑所在地区的宏观气候条件, 如宏观风速分布和风向(风玫瑰图)、宏观气温分布、太阳辐射照度、室外空气湿度等来确定该地区气候的自然通风潜力。在确定自然通风方案之前, 有必要收集建筑所在地区的气象参数逐时变化情况资料并进行分析。

3.2.2 确定建筑微环境的自然通风潜力

根据建筑微环境如建筑周围风速分布及气温分布、城市地形与布局(建筑平均高度、建筑分布情况、街道的布局、植被分布等)、建筑内部布置、建筑高度、室外噪声水平、室外污染等来确定建筑微环境的自然通风潜力。建筑微环境对自然通风的影响很复杂, 目前这方面的研究较少。

3.2.3 预测自然通风驱动力, 确定自然通风方案

根据建筑周围微环境和建筑内部情况(如热源分布、房间大小、房间的布置、内隔断、房间的位置等)预测自然通风驱动力, 确定自然通风方案和设计气流路径。一般情况下, 自然通风驱动力是很小的, 自然通风系统中风口两侧的压差一般小于 10 Pa 而机械通风系统风口两侧压差为 100 Pa ^[40]。当预测的自然通风驱动力很小时, 就需考虑是否可以通过改变建筑设计方案, 如用双层玻璃墙, 或设计为中庭式建筑, 或改变窗户形式、位置及大小等, 或采用风机辅助式自然通风。文献[41]从房间的进深(d)与高度(h)的关系考虑, 认为当 $d=2h$ 时, 采用单风口单侧通风较好; 当 $d=2.5h$ 时, 采用两风口单侧通风较好; 当 $d=5h$ 时, 采用贯流通风较好。而文献[42]建议, 当房间断面宽度小于或等于房间高度的2.5倍且可开窗户面积约为房间建筑面积的5%时采用单侧通风; 当房间断面宽度等于房间高度的5倍时, 可采用风力驱动的贯流通风。一般情况下, 贯流通风比单侧通风效果好, 如图14所示。

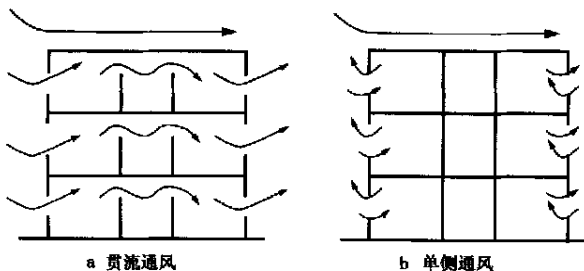


图14 贯流通风和单侧通风

3.2.4 根据设计要求和设计参数选择通风设备和确定通风设备的安装位置与大小

自然通风的设计要求和设计参数与机械通风有很大的差别, 因为在自然通风环境中, 人们能够忍受较大的温度波动范围, 而这个温度范围已超出了ASHRAE 55-1992标准的规定值, 所以应制定适合于自然通风的设计标准。目前还没有较完整的自然通风设计指南或手册, 而且目前的

研究成果还远远不能满足自然通风设计的要求。

自然通风设备主要指窗户、风口、排风竖井、天窗、门及风机等。窗户、风口的形式和安装位置是影响自然通风效率的关键因素。目前已研究出了适合于自然通风的自控型通风口。

3.2.5 控制系统的设计

因为影响自然通风的各种因素是动态变化的, 所以自然通风是一个动态变化过程, 如何在自然通风的动态变化过程中保证室内的热舒适性呢? 控制系统应起关键作用。自然通风控制系统一般包括手动控制和自动控制。手动控制以保证不同人的实际需要, 增强了人控制环境的自主能动性。自然通风的控制主要是对风口的控制。但如果是风机辅助式自然通风(混合通风), 则还须控制风机的启停, 控制问题变得复杂。

3.2.6 评估设计方案并作修改

评价一个设计方案的优劣, 首先应确立一个评价标准。自然通风系统评估标准应与机械通风系统评估标准有所不同。在评价一个机械通风方案时, 通常确定一些指标, 如通风效率、空气龄, 那么在评价一个自然通风方案时, 应确立什么样的评价指标呢? 这有待于进一步的探讨。

总之, 自然通风系统的设计应从动态和整体的观念出发, 与建筑结构设计密切配合, 需建筑师、土木工程师、建筑设备工程师及电力控制师甚至房主的参与, 未来建筑物的整体设计将越来越重要。另外, 自然通风系统的两个重要设计参数, 即通风量与室内温度相互影响, 故其设计还需借助于一些设计和分析工具。文献[42]对自然通风系统的设计和分析工具进行了较详细的论述。

4 自然通风研究存在的问题

自然通风本身的复杂性、对气候的依赖性、大气污染和噪声问题所带来的风险性、缺乏有效的模拟和设计工具是自然通风研究及设计的四大障碍。今后应从以下几个方面来开展研究: 自然通风条件下的热舒适性、自然通风系统的控制、自然通风动态过程、大风口建筑的自然通风、夜间自然通风、自然通风的防火问题及自然通风的设计分析工具和新设备的开发。

5 结论

自然通风是一种具有很大潜力的通风方式, 它具有节能、改善室内热舒适性和提高室内空气品质的优点, 但也受室外气候、建筑周围环境及建筑内部布局等因素的强烈影响, 故其设计和控制很复杂。目前的研究主要是基于一些简单的模型而得出的一些理论和实验结果。

自然通风的研究方法包括实验法和数值模拟法。由于在自然通风系统中, 温度与通风量相互影响, 故将一些流动模型软件如COMIS, CONTAMW, NatVent, Lesocool等与热模型软件如TRNSYS, EnergyPlus, BLAST等进行耦合来研究自然通风是很有必要的。

自然通风系统的设计还处于概念设计阶段, 由于理论研究还未成熟, 故其设计缺乏足够的理论指导。本文只给出了自然通风设计的一个思路, 总结了研究存在的问题即

未来研究的课题。

参考文献

- 1 Li Yuguo. Analysis of natural ventilation—a summary of existing solutions. <http://hybvent.civil.auc.dk/publications/Technical%20Reports/TR12%20AnaSol.pdf>
- 2 Li Yuguo. Analysis prediction and design of natural and hybrid ventilation for simple buildings. In: Proceedings of Hybrid Ventilation 2002 Fourth International Forum, Montreal, Canada, 2002. 154–168
- 3 Heijmans Nicolas. Impact of the uncertainties on wind pressures on buildings on the prediction of thermal comfort performances. In: Proceedings of Hybrid Ventilation 2002 Fourth International Forum, Montreal, Canada 2002. 179–186
- 4 Li Yuguo. Integrating thermal stratification in natural and hybrid ventilation analysis. <http://hybvent.civil.auc.dk/publications/Technical%20Reports/TR15%20TheStrat.pdf>
- 5 Li Y. Consideration of thermal stratification in multi-zone models of natural ventilation. The First International One Day Forum on Natural and Hybrid Ventilation, HybVent Forum '99, Sydney, Australia, 1999
- 6 Cooper P, Linden P F. Natural ventilation of an enclosure containing two buoyancy sources. *J of Fluid Mechanics*, 1996(6): 153–176
- 7 Linden P F, Cooper P. Multiple sources of buoyancy in a naturally ventilated enclosure. *J of Fluid Mechanics*, 1996(6): 177–192
- 8 Chen Z D, Li Y, Mahoney J. Natural ventilation in an enclosure induced by a heat source distributed uniformly over a vertical wall. *Building and Environment*, 2001, 36: 493–501
- 9 Cooper P. Ventilation and stratification naturally ventilated spaces driven by heated internal vertical source. The First International One Day Forum on Natural and Hybrid Ventilation, HybVent Forum '99, Sydney, Australia, 1999
- 10 Gladstone Charlotte Woods Aadrew. On buoyancy-driven natural ventilation of a room with a heated floor. *J of Fluid Mechanics*, 2001(16): 293–314
- 11 Li Yuguo, Delsante Angelo, Chen Zhengdong, et al. Some examples of solution multiplicity in natural ventilation. *Building and Environment*, 2001, 36: 851–858
- 12 Li Yuguo, Delsante Angelo, Symons Jeff. Prediction of natural ventilation in buildings with large openings. *Building and Environment*, 2000, 35: 191–206
- 13 Dascalaki E, Santamouris M, Bruant M, et al. Modeling large openings with COMIS. *Energy and Buildings*, 1999, 30: 105–115
- 14 Alexander D K. A comparison of wind tunnel and CFD methods applied to natural ventilation. <http://www.hvac.okstate.edu/pdfs/bs97/papers/P001.pdf>
- 15 Yoon D W. The evaluation of multizone air flow pattern and ventilation rates with trace gas methods in apartment house. In: Proceedings of 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Monterey, California, 2002. 296–301
- 16 Offermann F J. The impact of trace gas mixing on airflow rate measurements in large commercial fan system. In: Proceedings of 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Monterey, California, 2002. 320–325
- 17 Schmidt Dietrich. Experimental and theoretical cases study on cross ventilation - designing a mathematical model. *Nordic J of Building Physics*, 1999, 2
- 18 Chen Z D, Li Y, Mahoney J. Experimental modelling of buoyancy-driven flows in buildings using a fine-bubble technique. *Building and Environment*, 2001, 36: 447–455
- 19 Hunt G R, Linden P F. Steady-state flows in an enclosure ventilated by buoyancy forces assisted by wind. *J of Fluid Mechanics*, 2001(1): 355–386
- 20 赵彬, 林波荣, 李先庭, 等. 室内空气分布的预测方法及比较. *暖通空调*, 2001, 31(4): 82–86
- 21 Li Y. Analysis methods for natural and hybrid ventilation — An IEA ECB Annex 35 Literature Review. In: Proceedings of the 3rd International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning, Shenzhen, China, 1999. 12–30
- 22 Haghghat F. Zonal model—a simplified multizone model element. The First International One Day Forum on Natural and Hybrid Ventilation, HybVent Forum '99, Sydney, Australia, 1999
- 23 Axley James W. Surface-drag flow relations for zonal modeling. *Building and Environment*, 2001, 36: 843–850
- 24 Hensen Jan. A comparison of coupled and de-coupled solutions for temperature and air flow in a building. http://www.bwk.tue.nl/fago/hensen/publications/99_ashrae_decoupled.pdf
- 25 Dols W Stuart. A tool for modeling airflow & contaminant transport. *ASHRAE J*, 2001, 43(5): 35–41
- 26 Dorer Viktor. COMIS V3.1 simulation environment for multizone air flow and pollutant transport modeling. In: Proceedings of the 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2001
- 27 http://www.eren.doe.gov/buildings/tools_directory/software
- 28 Pedersen C O. EnergyPlus — the merger of BLAST and DOE-2. <http://eande.bl.gov/BTP/srg.html>
- 29 Hensen Jan. Modeling coupled heat and air flow: ping-pong vs onions. http://allserv.rug.ac.be/~hbreesch/research/art/EPIC_HildeBreesch.pdf
- 30 Zhai Zhiqiang, Chen Qingyan. Strategies for coupling energy simulation and computational fluid dynamics programs. In: Proceedings of the 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2001
- 31 Hensen Jan. Modeling and simulation of double-skin facade system. http://www.bwk.tue.nl/fago/hensen/publications/02_ashrae_dskin.pdf
- 32 Stringer Robert. Computer simulation of ventilation double-skin facade of metropolitan library in BRNO. <http://www.tc.cz/soubory/pdf/SessionC.pdf>
- 33 Coxford Ben. Ventilation of double facade. http://www.hvac.okstate.edu/pdfs/bs01/BS01_0229_236.pdf
- 34 Martin Bartak. Design Support simulation for a double-skin facade. <http://www.tc.cz/soubory/pdf/SessionC.pdf>
- 35 Heiselberg Per. Characteristics of airflow from open windows. *Building and Environment*, 2001, 36: 859–869
- 36 Fracastoro G V. Numerical simulation of transient effect of window opening. The First International One Day Forum on Natural and Hybrid Ventilation, HybVent Forum '99, Sydney, Australia, 1999
- 37 龙惟定, 潘毅群, 白玮. 智能建筑的室内生态环境. *暖通空调*, 2001, 31(4): 75–78
- 38 Bansal N K. A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings. *Building and Environment*, 1994, 29: 495–500
- 39 Kindangen J. Effects of roof shapes on wind-induced air motion inside buildings. *Building and Environment*, 1997, 32: 1–11
- 40 Sharples S, Chikengwe N. Optimizing the design of ventilators for natural ventilation. In: Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Monterey, California, 2002. 890–895
- 41 Levermore Geoff J. Simulation of a naturally ventilated building at different locations. In: *ASHRAE Trans*, 2000, 106: 402–407
- 42 BRE. Natural ventilation in non-domestic buildings. Building Research Establishment, Garston, Watford, UK