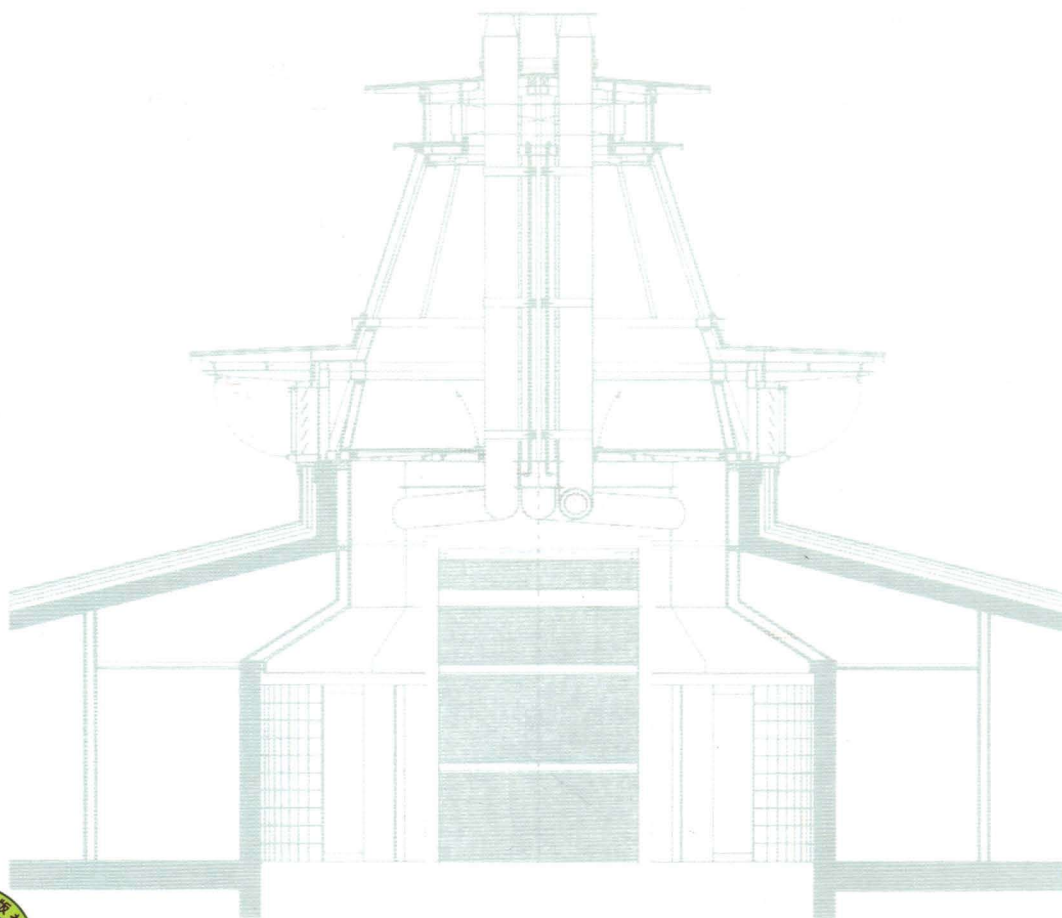


建筑设计与自然通风

Building Design and Natural Ventilation

陈晓扬 郑彬 侯可明 仲德崑 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

国家自然科学基金项目 (50808037)

『十二五』国家科技支撑计划课题 (2011BAJ03B04)

建筑设计与自然通风

陈晓扬 郑彬 侯可明 仲德崑 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内容提要

本书探讨的是自然通风的基本规律和设计方法。第1章拓展了自然通风的概念,提出了被动节能自然通风的概念和原理,将自然通风分为三种类型:加强自然通风、被动预冷自然通风和被动预热自然通风。第2章从群体布局和单体的形体、天井、通风弄、开口设计、导风措施、通风塔、太阳能烟囱、高耸空间利用、通风屋顶各方面探讨了加强自然通风的方法。第3章从蓄冷腔体通风、地下腔体通风、蒸发冷却通风三个方面探索了被动预冷自然通风的方法。第4章从屋顶腔体、立面腔体、地下腔体三个方面探索了被动预热自然通风的方法。第5章以皖南民居为例,从聚落规划、单体设计、材料构造层面详述了传统民居被动降温技术。第6~8章以后以专题形式探讨了大体量建筑自然通风、冷巷等特殊技术措施。

本书图文并茂,案例丰富,对建筑及相关专业的设计、研究人员以及学生有一定参考作用。

图书在版编目(CIP)数据

建筑设计与自然通风 / 陈晓扬等著. —北京: 中国电力出版社, 2011.12

ISBN 978-7-5123-2526-5

I. ①建… II. ①陈… III. ①房屋—自然通风—建筑设计 IV. ④TU834.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第270956号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 王 倩

责任校对: 李 亚 责任印制: 蔺义舟

北京盛通印刷股份有限公司印刷·各地新华书店经售

2012年3月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·13.25印张·297千字

定价: 58.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

自然通风与建筑设计的关系历经了重多变更。前工业化时期的建筑中，自然通风是一种自然而又必然的选择；工业化时期由于技术的进步，机械通风被认为是优越于自然通风的选择；当代则又进一步挖掘了自然通风的价值，它不仅是大自然的馈赠，同时也是降低建筑能耗的方式之一。在建筑设计中自觉运用自然通风方式改善热环境是一种趋势。自然通风也是建筑师在设计阶段较容易控制的环节，因为它通过空间组织来实现的方式。

本书探讨的是自然通风的基本规律和设计方法。第1章拓展了自然通风的概念，提出了被动节能自然通风的概念和原理，将自然通风分为三种类型：加强自然通风、被动预冷自然通风和被动预热自然通风。第2章从群体布局和单体的形体、天井、通风弄、开口设计、导风措施、通风塔、太阳能烟囱、高耸空间利用、通风屋顶各方面探讨了加强自然通风的方法。第3章从蓄冷腔体通风、地下腔体通风、蒸发冷却通风三个方面探索了被动预冷自然通风的方法。第4章从屋顶腔体、立面腔体、地下腔体三个方面探索了被动预热自然通风的方法。第5章以皖南民居为例，从聚落规划、单体设计、材料构造层面详述了传统民居被动降温技术。第6~8章以专题形式探讨了大体量建筑自然通风、冷巷等特殊技术措施。

本书第1~3章、第6章由陈晓扬编写，第4章由侯可明编写，第5章由郑彬编写，第7章由陈晓扬、仲德崑编写，第8章由陈晓扬、薛佳薇、郑彬编写，全书由陈晓扬统稿。

本书图文并茂，案例丰富，对建筑及相关专业的设计、研究人员以及学生有一定参考作用。

上篇 | 基础篇

1	被动节能自然通风方式的概念与原理	2
1.1	建筑自然通风应用与研究发展	2
1.2	自然通风基本常识	6
1.3	自然通风与被动节能	12
1.4	被动节能自然通风的环境与建筑策略	16
2	加强自然通风	26
2.1	加强自然通风的类型	26
2.2	布局策略	27
2.3	建筑设计策略	30
3	被动预冷自然通风	49
3.1	被动预冷自然通风的原理与类型	49
3.2	蓄冷腔体通风	52
3.3	地下腔体通风	64
3.4	蒸发冷却通风	72
4	被动预热自然通风	79
4.1	被动预热自然通风的相关原理与条件	79
4.2	屋顶被动预热自然通风腔体	81
4.3	立面被动预热自然通风腔体	90
4.4	地下被动预热自然通风腔体	107

下篇 | 专题篇

5	传统民居被动降温技术措施——以皖南民居为例	120
5.1	聚落规划层面的被动降温技术	121
5.2	单体设计层面的被动降温技术	131
5.3	材料构造层面的被动降温技术	167
6	大体量建筑的单元分区自然通风策略	185
6.1	平面单元的竖井式自然通风	185
6.2	大空间单元的热压式自然通风	188
6.3	竖向单元组合式自然通风	189
7	冷巷的被动降温原理及其启示	193
7.1	冷巷的类型及实测分析	194
7.2	冷巷降温技术要点及启示	195
8	泉州手巾寮民居夏季热环境实测分析	200
8.1	测试对象简介	200
8.2	总体热环境评价	201
8.3	天井的被动降温作用	202
8.4	冷巷的作用	204
8.5	垂直热缓冲作用	205

上篇 | 基础篇

1 | 被动节能自然通风方式的 概念与原理

1.1 建筑自然通风应用与研究发展

1.1.1 西方建筑自然通风研究进展

19世纪以前，建筑都采用自然通风方式，但是人们对自然通风的理解尚未深入，它只是一种被动的选择。由于当时技术条件限制，室内敞开式的火炉容易产生烟尘，从而降低室内空气品质，另外，燃烧未尽产生的CO还严重威胁到人们的健康和生命。自然通风的第一次技术进步就是热源和室内空气对流的分离。本杰明（Benjamin）发明的封闭式火炉可以用来给房间采暖同时又不污染室内空气，朗福德伯爵（Count Rumford）给敞开式火炉加上了烟气隔板。这两项发明可以为室内供暖而不污染室内空气。在西方进入城市化进程后，居住空间越来越拥挤，空气对流不畅严重影响了居民的健康，流行病频发，从而导致人们对自然通风状况不是很满意。1917—1918年间的全球流感大暴发让人们对开窗换气的接受度下降，而且由于知识体系的不完备，直到20世纪还有人相信呼吸夜晚的室外冷空气会导致患肺结核。后来人们又认识到，人呼出的空气也是室内空气污染源之一，室内空气淤积容易导致患病，空气需要置换。所以当可控的机械通风技术开始应用时，人们趋之若鹜。随着技术进步，机械通风可以用集成式的方法将供暖和置换空气两大问题同时解决，大大提高了室内舒适度。空气处理器可以制造室内小气候，生产出比自然通风更清洁的空气。自然通风开始被机械通风和空调系统取代，室内环境控制标准也是依据机械通风来制定。20世纪初美国就颁布了法规来限定建筑的通风量不少于 $30\text{ ft}^3/\text{min}\cdot\text{p}$ ，这只有机械通风系统能做到。美国采暖、制冷与空调工程师学会（ASHRAE）规定的通风标准也都是围绕空调系统而设，从 $5\text{ ft}^3/\text{min}\cdot\text{p}$ 到 $25\text{ ft}^3/\text{min}\cdot\text{p}$ 不等。有趣的是，ASHRAE历年来的通风标准都围绕节能与通风量这一对矛盾而变化。在西方工业化过程中，建筑自然通风方式不是主流。西方国家在相当长一段时期内都将人工环境视为自然环境的对立面，从而忽略地方自然条件而把建筑内部环境气候营造成为千篇一律的舒适模式。工程师们往往依据ASHRAE Standard 55或ISO 7730的舒适标准否定自然通风方式。

这些标准是为中央空调系统制定的，并在实践中广泛采用。

建筑自然通风这项适宜技术在当代发展的大背景是人与自然关系的反思和重建。能源危机与环境恶化也促使人们重新审视自然通风这种绿色建筑技术。当代自然通风的应用与被动节能策略是紧密相关的。人们认识到，合理利用自然通风能取代或者部分取代传统空调系统，不仅能少消耗不可再生资源实现被动热调节，而且能提供新鲜清洁的自然空气，有利于人的身心健康。另外一方面，对室内热舒适的理解也发生了变化。人们认识到，原有的通风标准已经滞后于建筑环境可持续发展的要求——应利用自然通风或者多元通风技术在建筑内部实现更人性化气候控制的创新发展。传统的热舒适标准的参数中忽略了重要的文化、社会及传统因素，它也不能解释人与环境相互作用的复杂性：人类可以主动地改变自己的行为，或逐渐适应环境。新的研究表明，自然通风方式的舒适性并不能用简单的人体热平衡模型来解释，人的舒适性感觉是随着外部气候条件的变化而变化的，这是一种主观结合客观的适应性模式。欧洲国家针对这种情况提出了自然通风建筑的适应性标准。适应性标准中没有固定的舒适温度值，而是随季节变化的舒适温度范围，它的特点是使可以接受的室内温度变化范围与月平均室外温度相联系。这种宽范围的舒适参考标准允许设计者以既能优化热舒适性又有可能以达到节能效果的方式来设计和运行建筑。而且对于自然通风建筑，不能采用常规的针对空调建筑的PMV模式进行舒适性评价，而必须采用一种地方化和对环境更为负责的方法。心理适应性、行为适应性和生理热适应性在自然通风建筑热舒适评价中的作用都是非常必要的。20世纪90年代由欧洲各国的研究成员组成的被动冷却课题（PASCOOL）研究组对自然通风方式进行了较系统的研究。通过大量的实验研究，PASCOOL研究了自然通风的各种方式：单侧通风、贯流通风、气流预测以及夜间通风等。其研究大大促进了这个领域的研究进展，然而其中多数研究所采用的模型如多区域网络模型是不够精确的，它把室内当成一个匀质的气流分布场，所以并不能预测气流的详细速度与温度等信息。

1.1.2 我国建筑自然通风研究

我国建筑领域在被动节能自然通风技术方面的研究起步较晚，导致在实践领域缺乏指导而滞后。首先是缺乏对我国地区传统适宜技术的挖掘和整理。我国地域辽阔，各地区都有应付地方气候条件的自然通风技术经验，如新疆民居用遮荫通风中庭和厚墙应对干热气候，西双版纳民居用利于通风的架空竹楼应对湿热气候等。局部地区的传统民居研究已有较为丰富的资料，如西北窑洞、巴蜀民居、华南民居等，比较翔实的文献资料有荆其敏所著《中国传统民居》、王其钧的《中国民间住宅建筑》、陆元鼎主编的《中国民居建筑》丛书等。这些资料为进一步挖掘民居适应气候策略提供了基础。建筑技术领域对传统适宜技术的研究从20世纪末已经逐渐展开，如刘加平等人对窑洞的研究，黎明对佛山东华里清代民居的热环境研究，李兴发对一颗印物理环境的研究，汤国华对岭南民居适应气候策略的研究，林波荣等人对徽派民居以及四合院物理环境的研究，杜高潮对传统民居风环境的研究等。窑洞的研究在覆土被动节能方面比较深入，西安建筑科技大学对传统窑洞进行过研究和技术改良，其中所采用的改良技术措施就是典型的被动节

能自然通风方式，为传统民居的当代改造创新提供了有益的参考。

另外，目前我国被动节能自然通风技术的研究在暖通等建筑技术领域已先行一步，而建筑设计方面的相关研究却相对滞后，这也影响了此项技术的推广。鉴于此，需要建筑设计方面的研究与技术领域进行研究进行相互补充和促进。目前建筑技术领域在这方面的主要研究内容有热压通风方式（如太阳能烟囱）的分析与优化、多元通风（自然通风与机械通风相互增益）模式研究、被动太阳房的热工模拟与分析、传统民居的物理环境模拟与分析等。建筑技术领域的主要关注的是模拟与分析，而建筑设计领域的研究主要关注建筑的空间布局、结构形式和构造方式等与优化建筑微气候之间的内在规律，并且可以借鉴技术领域的量化研究方法以增加研究的科学性。从21世纪初开始，暖通领域利用CFD（计算流体力学）软件对室内流场和温度场进行模拟，可准确得到室内任意时刻任意一点空气的温度、流速和气压等数据，这为研究提供了模拟计算和量化分析的可能性。

1.1.3 现代建筑自然通风实践

在建筑实践中，很多建筑师或从地方建筑技术中获得启发，或从生态建筑的高度进行思考，探索了多样化的被动节能自然通风方式。埃及的哈桑·法赛（Hassan Fathy）善于运用风塔来改善干热气候条件下的建筑热环境，并对这一传统技术进行了优化；印度建筑大师查尔斯·柯里亚（Charle Correa）是“构造设计学”的代表人物，他针对印度地方建筑而提出的“管式住宅”和“开敞空间”设计概念也包含了综合改善建筑热环境的被动节能通风技术；马来西亚的杨经文是“生态气候学”的提倡者，他在高层建筑中利用布局、朝向、反射、遮阳、绿化和双重立面等方式综合改善建筑热环境，利用“风墙”和“风闸”等设计以充分利用自然通风，在热带建筑被动节能通风方面作出了有益的尝试。西方发达国家的建筑师们在被动节能自然通风方面也有较多尝试，如附加温室、附加地下室、烟囱拔风、掩土和半掩土、通风屋顶、双层墙、蓄水、蒸腾冷却等适宜技术措施都被用来改善室内气候环境。建筑中充分利用风压和热压加强自然通风，较典型的采用被动节能自然通风方式的例子有英国房屋研究机构办公楼、英国芒福特大学皇后楼、诺丁汉英国国内税务中心、卡塔尔大学、印度康城章嘉公寓、美国戴维斯住宅、马来西亚梅那拉商厦、法兰克福商业银行等。

我国在这方面的现代建筑实践相对滞后。我国建筑设计比较强调自然通风，但是如何在保证自然通风的前提下利用被动节能设计改善室内热环境一直是实践的薄弱环节。在20世纪70年代初曾经有过利用地下风道解决电影院通风的尝试，如山东剧院、重庆五一电影院、乌鲁木齐光明电影院等。这些电影院在夏季都能将室内温度维持在31℃以下，节能效果较好。我国20世纪80年代初与德国专家合作，在一些北方农村地区进行了短暂的太阳能建筑试点，所采用的基本是特朗伯墙被动节能系统。其中部分涉及被动节能自然通风方式，但不是研究重点，而且只单一涉及太阳能的被动利用。但是由于当时节能的紧迫性不突出，这些20世纪七八十年代积累的技术没能持续发展。充分认识到自然通风的节能效果并应用于建筑实践是始于20世纪90年代末期，近年来陆续有了利用被

动节能自然通风方式进行节能设计的案例。吉林省自然博物馆的设计中采用了地道风和附加温室的被动技术；济南交通学院图书馆采用了地道风、热压诱导自然通风、附加温室等被动技术；北京大学附属小学扩建中采用了地道风、双层表皮、拔风烟囱等被动技术来调节教室微气候；上海建筑科学研究院在莘庄的生态建筑示范项目中，就尝试采用并研究了利用热压加强自然通风的适宜技术。

1.1.4 建筑自然通风的未来发展方向

1.1.4.1 挖掘通风适宜技术

建筑通风的发展似乎经历了一个循环，工业化时代机械通风否定了自然通风，到当今自然通风又重新被重视。当然此时的自然通风观已不是前工业时代的自然通风观，大量的知识储备大大丰富了我们对于自然通风的认识。在这些知识储备中，传统技术是宝贵的财富。我们的祖先们在有限条件下适应自然环境，获得了与自然和谐相处的建筑营造经验，这些经验在当代看来是科学的、适宜的、绿色的。从传统技术中汲取营养，是当代适宜技术的重要内容。适宜技术是以现代技术为平台的多样化技术体系，它在实践中的应用策略体现在对现有技术的综合应用中，它对待传统技术的态度是兼容并蓄。传统通风技术中回应地方气候的基本原理在当代依然具有价值，辅以现代技术的支持，它们能重新获得适宜性。现代材料技术、构造技术、施工技术的改造可以使传统技术在功能性、经济性方面都得到了拓展。现代建筑技术回应气候的方式中，或多或少都会借鉴传统技术的原理，以充分利用阳光、空气、水、土壤或者植被等资源。

通风适宜技术的目标是通过建筑本身的科学设计来回应地方环境，以较小代价达到舒适性与节能性的平衡，它在未来有很大的发展潜力。而且由于适宜技术可以不需要复杂高深的技术支持，在方案设计中就可以将其概念贯穿，所以建筑师在挖掘通风适宜技术的工作中大有可为。埃及的哈桑·法赛，印度的查尔斯·柯里亚、多什（Balkrishna Doshi），马来西亚的杨经文（Ken Yeang）等知名建筑师都不遗余力地从地方技术中汲取营养，挖掘适宜技术并将之应用于现代建筑设计中，取得了很好的效果。

1.1.4.2 多元通风策略

自然通风是解决建筑通风问题的手段之一，在某些场合它的应用有一定局限性，比如寒冷的冬天或者炎热的夏天，纯粹自然通风可能会降低室内舒适性，这时候就需要机械设备调节空气。由此就产生了在同一建筑中同时存在自然通风系统与机械通风系统的情况。

多元通风系统是一个能够在不同时间、不同季节利用自然通风和机械通风的混合系统。它的基本原理是通过在机械通风和自然通风之间切换以维持良好的室内环境，减少全年内空调系统使用时间从而达到节能效果。系统运行模式随着季节变化而改变，或者在每天的不同时间段系统的运行模式都适应外部环境状况。多元通风系统由建筑、内部负荷、自然驱动力和外部环境决定，应以最节能的方式满足内部环境的需求，并能最大限度地利用周围的能量。控制策略是其中较为关键的环节，需要在运行高级自动控制设备和使用者直接控制二者之间找到一个平衡位置。未来应用及研究的主要方向

有：① 新建及改造建筑中多元通风系统控制策略；② 开发预测多元通风系统性能的方法；③ 选择合适测量技术对采用多元通风系统的建筑进行诊断；④ 提高办公及教学建筑中的多元通风系统能量效率和成本效率。

1.1.4.3 需求通风（DVC）与微型机电技术（MEMS）

需求控制通风（Demanded-Controlled Ventilation）能根据室内空气IAQ变化自动控制通风量，从而达到节能效果。一般DVC由传感器、控制系统和传统送风系统组成。目前的DVC系统传感器以及控制系统较昂贵，且监测参数有限，一般仅限于相对湿度、CO₂、CO浓度等。MEMS（Microelectromechanical System）技术的发展能弥补DVC的不足，它的微型芯片中集成了电子和机械功能，是未来传感器的发展方向。这种传感器选择性强、成本低，能直接监测室内空气的各种参数，它甚至能实时确定室内环境任意位置的空气质量指标。DVC或MEMS目前被用于空调系统中实现智能化楼宇管理，但在将来在自然通风或者多元通风建筑中，此类技术将得到普及。自然通风的缺点就是它的随机性以及不可控性，但是通过DVC或MEMS系统，自然通风建筑内也可以实现自动控制，从而进一步实现建筑通风的舒适度与节能性的高度协调。

1.1.4.4 动力阻隔（Dynamic Insulation）或微孔通风（Pore-ventilation）

动力阻隔或微孔通风措施是设置渗透性的墙体，可以使冷空气从外到内渗透进来，控制气压差或气流路线可以确保渗透空气将热量从室内传导到室外。同时，渗透墙体还可以充当自然通风的过滤器。其中还有很多研究工作要开展，比如确定渗透墙体空腔内污染物的特点和对健康的影响、渗透风与热传导的耦合、孔隙率与墙体厚度的确定等。

1.2 自然通风基本常识

1.2.1 自然通风基本方式

1.2.1.1 风压通风

风压通风是利用建筑迎风面与背风面的空气压力差实现的空气流动，这是最常见自然通风方式。当风吹向建筑时，因建筑的阻挡，会在建筑迎风面产生正压力。气流绕过建筑时，会在背面形成负压力。如果建筑有开口，气流就从正压区向负压区流动。流动的空气随着流速的增加而压力减小，从而形成低压区，周围的空气在补充低压区的时候也实现了空气对流，这就是建筑内部实现对流换气的基本原理（图1-1）。根据这一原理，宜在建筑内部保留贯通的风道，当风在通道中吹过时，会在通道中形成负压区，从而带动整个建筑内部的空气对流。如果这种风的通道极具方向性，即通风管道在一定方向上贯通而在其他方向上是封闭的，这就是管式建筑的通风组织原理。利用管式通风，可以解决大进深建筑空间的通风问题。如广东的“竹筒屋”或者闽台的“手巾寮”就利用了管式通风来解决小面宽大进深房屋的通风难题。在具有良好外部风环境的区域，风压通风是实现自然通风的主要手段。

1.2.1.2 热压通风

热压通风是利用建筑内部空气热压差来实现空气流动。热空气密度小，由于浮力作

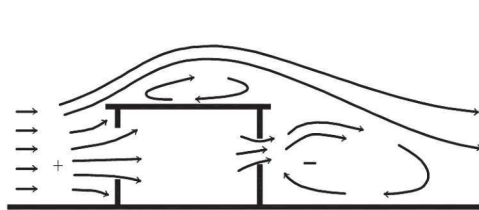


图1-1 风压通风示意

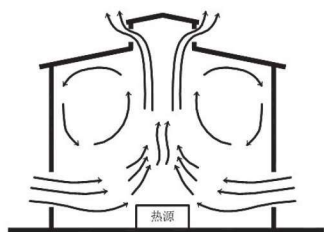


图1-2 热压通风示意

用而上升，从而带动了建筑内部的空气对流。利用这一原理，在建筑上部设排风口，在建筑底部设进风口，可将污浊的热空气从室内排出，而室外新鲜的冷空气则从建筑底部被吸入（图1-2）。热压作用与进、出风口的高差和室内外的温差有关，室内外温差和进、出风口的高差越大，则热压作用越明显。一般室内外温差是一定的，而热压与风口高度差成正比，所以在竖向的腔体中，这种热压作用比较明显，这就是我们通常所说的“烟囱效应”。在建筑设计中，可利用建筑物内部贯穿多层的竖向空腔——楼梯间、中庭、拔风井等增加进、排风口的高差，并在顶部设置可以控制的开口，将建筑各层的热空气排出，达到自然通风的目的。与风压式自然通风相比，热压式自然通风更能适应不稳定或者不良的外部风环境。

1.2.1.3 机械辅助式自然通风

机械辅助式自然通风是利用机械设备辅助来完善自然通风的一种通风方式。在一些大型建筑中，由于通风路径较长，流动阻力较大，单纯依靠自然风压与热压可能不能满足室内通风要求。另外在空气污染和噪声污染比较严重的环境中，直接的自然通风还会将室外污浊的空气和噪声带入室内，不利于人体健康。在这种情况下，常常采用一种机械辅助式的自然通风系统，如在通风管道中附加风扇。该系统有一套完整的空气循环通道，在通道中用风扇等机械设施增加动力。这种方式与纯粹机械通风的区别在于系统的主体依然是自然通风系统，机械设备只是少量的和起辅助作用的。

通常自然通风有过分依赖外部风环境的缺点，当室外风速过低或者通风路径很长时，自然通风可能无法满足建筑内部通风需要，此时的选择可以有空调系统和机械辅助通风系统，后者比前者的初投资和运行费用都要少得多，具有明显的经济性。所以只要在能满足室内热工需求的前提下，机械辅助式自然通风依然是相对节能的选择。如果结合绿色生态的空气预处理手段，如土壤预冷、预热、深井水换热等，这种通风方式有相当大的节能潜力。

1.2.1.4 双层表皮

双层表皮是在维护结构中被动利用太阳能组织空气流动以提高室内舒适度的一种间接通风方式。这种方式也利用了热压通风原理。它是西方国家生态建筑中所经常采用的一项技术，被誉为“会呼吸的皮肤”。双层表皮的最初雏形是1881年美国的爱德华·莫尔斯（Edward S.Morse）发明的太阳能采暖装置。他发现将建筑朝阳面的窗户关闭后，窗户与深色窗帘之间有热气流产生，他以此为灵感设计了一种太阳能采暖装置（图1-3），

并把它应用到了建筑设计中，据观察表明，空气经流加热器增温明显。以此为原型，后来发展出了双层表皮技术。双层表皮可以是外层透明材料加内层常规墙体（图1-4），也可以是多层玻璃加百叶。双层玻璃幕墙是其中最具有代表性的，它一般由双层玻璃或三层玻璃组成，在外两层玻璃之间留有一定宽度的空隙形成空气夹层，通常还配有可调节的深色百页。在冬季，空气夹层和百页可以形成一个利用太阳能加热空气的小型温室装置，通过蓄热提高建筑外墙表面温度，有利于建筑的保温采暖；在夏季，则可以利用热压原理将热空气不断从夹层上部排出，达到降温的目的。对于高层建筑来说，直接对外开窗容易造成紊流，不易控制，而双层玻璃幕墙则能够很好地解决这一问题——窗户向立面夹层开启，间接获得自然通风。如果在双层玻璃幕墙上设计可开关的通风孔，根据不同的季节或者不同时间段调节气流组织模式，又可进一步增加幕墙的气候适应性，这种双层玻璃幕墙又称为“通风式节能幕墙”或“呼吸式玻璃幕墙”。通风式节能幕墙的中间夹层为通风换气层，它利用了“烟囱效应”与“温室效应”的原理，夹层内部空气由于太阳辐射加热而导致对流和换热。根据通风层结构的不同可分为“封闭式内循环体系”和“敞开式外循环体系”（图1-5）。封闭式的一般在寒冷地区使用，夹层主要起温

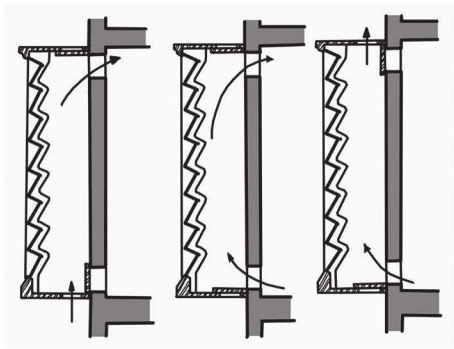


图1-3 爱德华·莫尔斯设计的太阳能装置

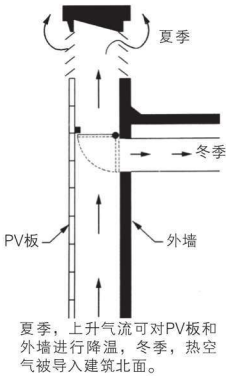


图1-4 透明材料加墙体的双层表皮

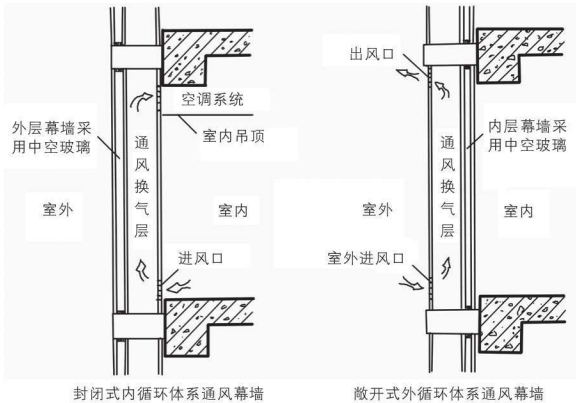


图1-5 呼吸式双层幕墙

室作用。敞开式适宜于夏热冬冷地区，夏季打开风口，夹层内部产生烟囱效应，被加热空气上升逸出产生对流，降低内层玻璃的温度；冬季关闭风口，夹层内产生温室效应，有效提高了内层玻璃温度。通风节能环保幕墙比传统幕墙采暖时节能42%~52%，制冷时节能38%~60%。¹ 双层玻璃幕墙在冬季和过渡季节使用的优点是显而易见的，然而在夏季的使用存在一定风险，由于大量使用玻璃，在夏季可能会增加太阳辐射得热而使夹层内温度升高，从而引起室内过热并且引起能耗增加。

1.2.2 自然通风环境下的热舒适与节能性

1.2.2.1 热舒适模型

ASHRAE Standard 55或ISO 7730的通风标准是建立在维持恒定的室内热环境基础之上的，并没有区分在自然通风和空调建筑中感受的差异，而且也忽视了重要的地方文化、社会以及传统因素，导致了对空调的一味需求。这些标准源于实验室使用的人体热平衡模型，试图对热舒适提供一个统一的客观的标准。这种标准在现代建筑的传播中起到了推波助澜的作用，由于可以通过空调“制造气候”，千篇一律的现代建筑就可以超越地方气候环境和文化传统在世界各个角落出现。而自然通风的热舒适标准宜采取现场测量的方式，只有这样，才能解释传统和感性的因素。热舒适问题涉及三个层面：心理、行为、生理。

1. 生理适应指长期处于特殊的或相对极端的环境中的生理反应。比如在热气候或剧烈活动中，人体通过出汗降低体温。这是最基本的人体适应环境自我调节能力。

2. 行为适应性指人通过行为调节来适应环境，这种行为包括改变衣着、控制活动程度、打开电扇或加热器、调整风口等。行为调整为人们保持热舒适提供了最好机会。在自然通风建筑设计中，为人们提供充分机会以使其调整或控制室内气候。空气流速被认为是行为适应性的一种形式，诸如开关窗、开关风扇或调节通风口等。在ASHRAE Standard 55中规定空气调节建筑内的平均空气流速低于0.2 m/s，而在自然通风建筑中，当室内温度超过26℃时，允许超过该限定流速。

3. 心理适应即环境适应性，是指由于过去的经验而产生的对身体状况的感觉变化和反应。人反复接受某种外部刺激将导致应激能力的降低。例如长期处于热气候中，人对舒适温度的预期也将低于实验室数据，因为人对热舒适温度的心理阈值已提高。实验室的数据忽略了这种心理因素。

自然通风建筑的热舒适标准应综合这三方面因素来进行制订。人们通过对空调建筑与自然通风建筑进行观测实验，发现在自然通风建筑中的人体感觉舒适温度与预测值有较大差异，人们倾向于在热环境中更耐热而在冷环境中更耐寒。这意味着控制人体热平衡的物理过程不足以解释自然通风建筑的感觉热舒适与外部气候条件之间的关系。针对自然通风环境，发展出来了适应性模型（behavioral adaptation）。适应性模型的特点就是使可以接受的室内温度变化范围与月平均室外温度相联系。建议的自然通风建筑舒适标

1 谢士涛. 通风节能环保幕墙[J]. 建筑学报, 2002/07: 30.

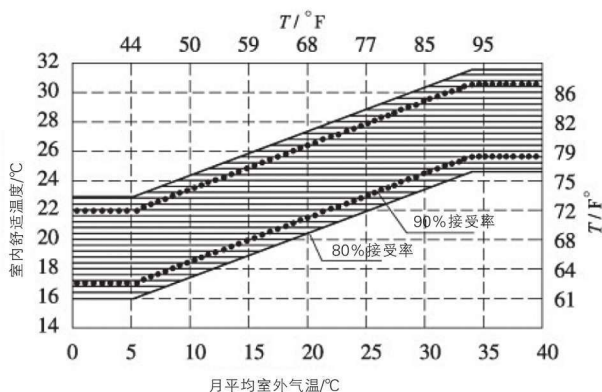


图1-6 自然通风热舒适适应性模型

准如图1-6所示。在建筑设计过程中,通过模拟数值与该标准进行比对,可以预测该建筑是否适合使用自然通风。该标准给定的是一个较宽的范围。事实上,在许多气候环境中,空调建筑中保持较窄的变动范围或者恒定温度没必要而且能耗高。适应性标准的提出为自然通风在实践中的应用提供了依据。

1.2.2.2 热舒适温度

不同气候区居民的热舒适温度范围会有差异,有些地方的居民可以接受更高的温度。这对节能较为有利。有研究者对澳大利亚布里斯班(Brisbane)和墨尔本(Melbourne)两座城市进行了现场数据调研,发现前者的自然通风舒适温度要比后者高 1.7°C ,在布里斯班自然通风环境热舒适温度要比空调环境高 1.3°C 。¹布什(Bush)对曼谷办公建筑中自然通风和空调环境进行了比较,发现自然通风环境热舒适温度比空调环境要高 2.7°C 。奥斯里德(Oseland)在英国的类似调研则发现,自然通风环境中夏季和冬季的热舒适温度要比空调环境范围宽 2.4°C 和 2.6°C 。²王昭俊等人对哈尔滨冬季热环境进行了现场调查,研究得出哈尔滨冬季中性温度为 21.5°C ,80%居民和接受的温度范围为 $18\sim 25.5^{\circ}\text{C}$ 。³夏一哉对北京88户自然通风住宅进行现场调研,发现80%居民可接受的温度上限为 30°C 。⁴叶晓江等人对上海自然通风住宅热环境进行调研,发现自然通风环境中可接受的温度范围为 $14.7\sim 29.8^{\circ}\text{C}$,而且居民热感觉的中性温度随季节变化。⁵杨薇等对上海自然通风住宅夏季热环境的研究发现,居民热感觉的中性温度为 28.3°C ,可接受的温度上限为 31.6°C 。而空调建筑中热中性温度为 27.7°C 。⁶

- 1 de Dear RJ, Auliciems A. Validation of the predicted mean vote model of thermal comfort in six Australian field studies [J]. ASHRAE Transactions, 1985, 91(2b):452-468.
- 2 Oseland NA. Acceptable temperature ranges in naturally ventilated and air-conditioned offices [J]. ASHRAE Transactions, 1998, 104(2):1018-1036.
- 3 Wang ZJ, Wang G, Lian LM. A field study of the thermal environment in residential building in Harbin [J]. ASHRAE Transactions, 2003, 104(2):350-355.
- 4 夏一哉, 赵荣义, 江亿. 北京市住宅环境热舒适研究 [J]. 暖通空调, 1992, 12(2):1-5.
- 5 Ye XJ, Zhou ZP, Lian ZW, et al. Field study of a thermal environment and adaptive model in Shanghai [J]. Indoor Air, 2006, 16(1):320-326.
- 6 杨薇. 夏热冬冷地区住宅夏季热舒适状况以及适应性研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2007, 38.

可见,各地居民所能接受的温度上限不同,夏热冬冷地区的居民耐热性稍好,可接受的温度上限约为30~31℃。

1.2.3 自然通风研究方法

1.2.3.1 计算流体力学(CFD)

一般的研究方法中都是假定室内空气为匀质分布,每一点的温度与气流速度都被假定成一样的,这与现实情况并不相符。这种简单假设的计算结果使室内人员活动区的实际空气质量与计算或者预测结果有较大差距。CFD的出现为通风流场的研究带来了巨大变革。该方法是将房间用空间网格或粉成无数很小的立体单元,然后对每个单元进行计算,只要单元体划分得足够小,就可以认为计算值代表整个房间内空气分布情况。所以从理论上讲,CFD模拟能确定流场中任意时刻任意点的气压、风速、温度以及气密度等指标,并跟踪其变化。前人的研究证明,CFD研究方法的误差较小,是目前较为精准的一种通风研究方法。基于其相对准确的模拟,可以在设计阶段预测建筑内部的通风以及温度分布情况,从而知晓自然通风系统能否适用以及什么情况下适用。另外,还可以有效地进行多方案比较,优化设计方案的通风效率或节能性。

基于CFD的气流分析软件有FLUENT系列、FLOEVENT、STAR-CD、PHOENICS、CFX等,其中FLUENT系列里,AIRPAK是专门针对建筑通风的分析软件。国内建筑技术领域内的通风模拟研究中,AIRPAK是使用频率最高的分析软件。本研究主要采用的模拟方法即为CFD方法,所采用的模拟软件为AIRPAK。

1.2.3.2 多区域模型法

假定各个房间内空气的特征参数是均匀分布的,就可以将房间看成是一个节点,将窗户、门、洞口等看成是连接。这样的模型比较简单,它可以宏观地预测整个建筑的通风量,但是不能提供房间内的详细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求出流量。由于误差较大,它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,不适合预测建筑内部详细的气流信息。

1.2.3.3 区域模型法

区域模型法与多区域模型法有类似的地方,但是比多区域模型法更复杂一些。多区域模型法由于过分简化系统而产生很大误差,尤其是当房间内部空气分布呈明显分层的时候。区域模型法就针对这一情况,在定性分析的基础上把房间划分成一些子区域,每个子区域内的空气分布特征是匀质的,子区域之间存在热质交换,建立质量和能量守恒方程。该方法比多区模型法更精确,但比CFD简单。有一些专门气流分析软件是以这种模型为基础,如SPARK、COMIS和CONTAMW。

1.2.3.4 实验法

比较传统的自然风场模拟实验法是风洞模型实验法,它通过相似模拟能大致得出建筑表面及建筑周围的压力和速度场,从而预测通风情况。第二种实验法是示踪气体测量法,先在房间被注入一定量的示踪气体(如甲烷、二氧化碳或者5%氢气混合95%氮气),随着示踪气体在房间的扩散与渗出,示踪气体浓度呈衰减趋势,通过该方法可以用来测