

基于风压通风的建筑空间形态优化设计研究

Study on Spatial Form Optimization of Buildings Based on Wind-driven Ventilation

张军学 | ZHANG Junxue 吴国栋 | WU Guodong 韩冬辰 | HAN Dongchen

中图分类号: TU-201 文献标志码: A 文章编号: 1001—6740 (2024) 05—0108—08 DOI: 10.12285/jzs.20230602001

摘要: 本文以风压通风既有研究为基础, 对惯用的浅进深平面建筑形态提出优化建议, 以应对城市弱风环境或空旷区域强风。提出负风压通风的机制, 总结建筑侧面及屋顶负风压驱动空气流动的应用场景、空间形态和气流组织策略, 将风压通风使用范围拓展至大进深平面。结合计算机模拟和案例佐证, 为建筑空间组织和形态设计赋予空气动力逻辑。

关键词: 风压通风设计、空间形态优化、平面进深、正风压通风、负风压通风

Abstract: Based on the existing research on wind-driven ventilation, the optimization suggestions for the usual shallow plane space are proposed to cope with the weak wind environment in the city or the strong wind in the open area. The mechanism of negative wind pressure ventilation is proposed, and the application scenarios, spatial form and airflow organization strategies of negative wind pressure driving air flow on the side and roof of buildings are summarized, and the scope of use of wind pressure ventilation is extended to the large depth plane. Combined with computer simulation and case evidences, it gives aerodynamic logic to the space organization and form design of buildings.

Keywords: Wind-driven ventilation design, Spatial form optimization, Plane depth, Positive wind pressure ventilation, Negative wind pressure ventilation

作者:

张军学, 江苏科技大学土木工程与建筑学院副教授;
吴国栋 (通讯作者), 苏州大学建筑学院讲师, 国家一级注册建筑师;
韩冬辰, 苏州大学建筑学院副教授。

江苏高校哲学社会科学研究一般项目 (2024SJB1023);
江苏高校哲学社会科学研究重大项目 (2023SJD131);
国家自然科学基金青年项目 (52108022)。

录用日期: 2023-08

热环境是建筑内部环境调控最为重要的组成部分, 其调控能耗占比极高。在我国, 供热通风与空调系统 (HVAC) 能耗约占建筑运行总能耗的 47%^①。建筑封闭气候边界、机械通风降温的做法, 已被证明是高能耗的且不利于使用者的生理和心理健康。天气条件适宜时的自然通风能够有效地置换室内污浊空气并降低室内温度, 在无能耗或低能耗状态下改善室内热环境。风压通风是最常用的自然通风方式, 借助自然风压将室外新鲜空气送入室内, 推动室内废热空气和污染物排出, 促进人体热舒适。但城市日益密集的建成环境经常导致建筑迎风面风压不足, 无法有效利用

这一自然驱动力, 这使风压通风具有间断性和不稳定的特征。另外, 常年风大地区直接在迎风立面开窗会引入速度过大的气流, 引起使用者不适, 或因增强渗漏通风导致室内调控热环境的能耗升高。通过空间形态优化设计合理组织引导气流, 利用室外风产生的正压或负压^②驱动力促进室内外空气顺畅流动是本文探讨的核心议题。

一、建筑单体风压通风的空间形态研究

一栋自然通风良好的建筑必须在设计阶段考虑本体内部及自身与周边建成环境间的气流问题。

建筑单体空间形态影响风压通风的研究主要聚焦于以下几点：

1) 外部形体。建筑物阻碍空气流动的现象是典型的钝体绕流^③。建筑外部形体的形态，如建筑高度、屋顶形式、长宽高比值、表皮肌理等，能够调控气流绕过建筑表面的速度和流动状态，这些因素影响表面风压分布，继而间接调控开口、引入外部气流。

2) 平面进深。实现对流通风(Cross ventilation, 亦称穿堂风)需要满足进深 $W \leq 5H$ (H 为室内净高)，单侧通风^④(Single-sided ventilation)需满足 $W \leq 2H$ 。使用常规层高时，一般认为空间进深小于14m易于形成穿堂风。基于此，一字形平面最有利于风压通风，L形、T形、H形、山字形等浅进深的平面组合均有助于促进风压通风，但转角处通风效果不佳。大进深建筑可使用热压通风或机械通风。

3) 朝向^⑤。在理想状态下，建筑宜朝向温暖季节的主导风，使尽量多地使用空间引入室外新鲜空气。季风气候中适合风压通风的过渡季节风向多变，且城市环境中到达建筑单体的气流来向通常与市域风玫瑰代表的风向并不一致^⑥，建筑朝向应结合周边建筑肌理、过渡季最高频风向、景观要素、日照等综合判断。进风口设计容易适应不太理想的朝向，建筑朝向应以利用太阳能优先。

4) 虚空间。与建筑实体相对应，冷巷、架空、庭院、室外风廊等虚空间能促进建筑周边的空气流动。合理的虚空间形态可利用空气动力学原理促进或抑制气流，再通过建筑表面开口间接影响内部气流运动。虚空间的方向及开口位置是关键设计要点。

此外，一些细节设计能影响室内通风质量，如开口设置(位置和面积)、开窗方式、导风板、室内空间分隔及家具摆设^⑦等，但这些小通风因子对实质通风计划并无太大帮助，宏观的空间形态设计是良好风压通风更可靠的保证。针对不同场地及当地风环境，对建筑外部形体、虚空间进行优化设计，以利用恰当的风压驱动力来

营造合理的气流导引组织方面，仍有较多可探讨的内容。

二、正风压通风的形态优化

风压通风的有效性依赖于空气三维流动时产生的建筑表面的压差。通常来说，迎风面为正压，设进风口；背风面是负压，设出风口。进风口处迎风面阻风形成的正压提供了空气进入室内并流动的主要动力，使用风压通风的多层建筑宜提升此驱动力。但常年风大区域或寒冷季节防止建筑围护面风压过大的议题也不容忽视。

1. 阻风蓄压的形态

风压驱动的空气能否在室内顺畅流动，取决于室外风的强度、方向及室内流动阻力。因风速风向多变，为保证穿堂风有效，控制进出口间的距离、保持内部开敞，可避免气流能在流动过程中过度损失，减小流动阻力。限制建筑形体进深尺寸能最直接地减小进出口间的距离，因此使用风压通风的建筑平面通常修长而狭窄。在浅进深前提下，建筑宜优化自身形

体，在弱风环境中积极提升迎风面风压。

1) 迎风前倾的形体

风吹向建筑表面时，迎风面风压在竖向具有分布差异。因近地面处风速随高速增加而增大，气流遇建筑物阻碍将动能转化为压力势能^⑧，造成迎风表面的上部风压大于下部。故上部空间较下部有更充足的风压动力，使内部空气流动更加顺畅。对三个截面积、高度和长度相等的长条体量进行同等风况的计算流体力学(CFD)模拟发现，当来流风垂直于长边时，三者迎风面的风压差异明显(图1a、1b、1c)。较矩形体量，迎风前倾形体的迎风面上部高压区和底部风压有明显增大，迎风后仰形体上部高压区和底部风压明显减小。风向改变时有类似差异。对各层同等进深的多层建筑进行模拟比较，发现逐层出挑前倾的建筑各层室内气流更加通畅，且风影区空气龄改善明显(图2)。这证明前倾形体能够增强风压通风。

屋顶挑檐是体量前倾的极端形态，通过模拟可知挑檐亦会增大迎风面风压(图1d)。在湿热气候中，大挑檐具有重要的气候调控作用，实现遮阳与增压并举。窗洞上部的挑板具有类似功效，兼具

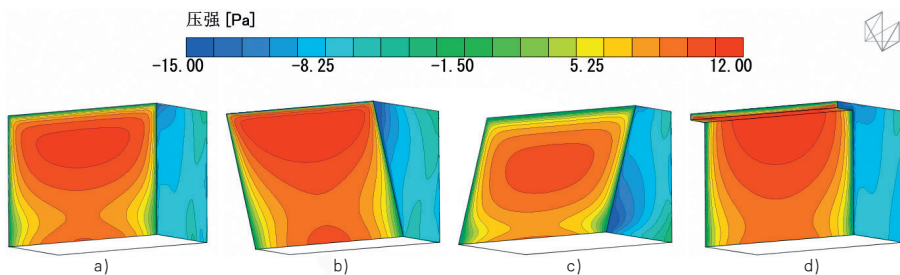


图1：矩形体量、前倾体量、后仰体量及挑檐长方体迎风面风压对比

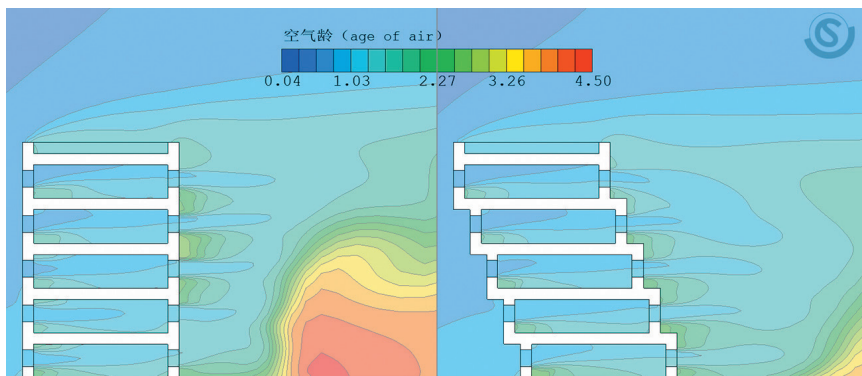


图2：矩形体量和逐层出挑体量对流通风时室内外空气龄云图对比

遮阳板与导风板功能。

伦敦新市政厅（福斯特及合伙人事务所，2002年）的形体为一个向南倾斜的变形球体，出挑的楼板成为遮阳设施，且提高南向各角度的风在南立面的风压（图3）。对于流速较低的局地风^⑤，前倾形体也便于蓄积风压。如图4所示临湖建筑，在夏季白天静风时段，湖面和城市热力差异导致的朝城市方向的气流因立面前倾而增大近地面压强，为底部开窗引入外部空气提供了动力。

2) 迎风内凹的形体

除了剖面上的形体变化影响迎正面正压，平面凹凸也可调控形体对自然风压的捕捉。图5显示两个平面面积和高度均相同的形体的表面风压，当来流风垂直于背面长边时，形体内凹的迎风表面风压明显大于外凸形体。风向改变时，风压分布有类似差异。两体量的体积和迎风面积均一致，但内凹面能接收更大的风压。东莞中集总部办公楼（悉地国际，2015年）平面呈指状，多个14m进深的办公单元最大化地形成形体内凹，捕捉多个方向的来流

风；立面锯齿状玻璃幕墙形成表面内凹，相较平整墙面，内开启扇打开时能加大室外空气的流入量，促进对流通风（图6）。

2. 导风泄压的形态

使用风压具有双面性，即“用”与“防”两方面。设计中，除了考虑阻风蓄压推动空气流入建筑，还应注意防风。在不使用自然通风的时节，强风引起的空气渗漏会增加用能负荷。讨论阻风蓄压的两个模拟对比案例亦提供了缓解风压的形体特征：迎风后仰或尖劈状形体可减轻强风侵袭。通过形体分段、设置孔洞及局部架空等手段形成可渗透形体，也能够应对强风、防止风害，对高密度城市环境中减少空气流动阻塞亦有助益。

1) 分段

建筑防风的议题不只在寒冷季节或北方地区存在，在温暖或炎热气候的一些地区也存在。我国华南、华东沿海及澎湖、金门的民居以厚重石墙、小窗、屋瓦压石、防风墙为造型，这是防风型民居的体

现。考虑到台风或飓风的存在，一些低纬度沿海及海岛地区必须考虑建筑防风。建筑高度一定时，平面的长宽比过大时会造成迎风面风压激增，而分段处理形成的缝隙会释放表面风压（图7）。因此将大尺度建筑分段处理可降风压、防风害。

新喀里多尼亚的吉巴欧（Tijbaou）文化中心^⑥（伦佐·皮亚诺建筑工坊，1998年）坐落于一小型半岛之上，南侧临海，北侧临潟湖，风常年从海面流向潟湖。其呼应当地原住民棚屋的现代棚屋造型，以及在不同风环境下通过双层表皮间的空腔及开口的调控进行自然通风的做法，为人称道。但其用风和防风措施体现在更宏观的形体布局上。建筑主体多为一层，舒展的体量顺着半岛延伸的方向匍匐于地面之上，朝向主导风，为穿堂风提供了前提。三条顺着风向的“廊道”将建筑分为四组，一个水平屋顶将各组团连接，组团间隙风速较大，能显著改善半室外空间的人体热舒适，亦保证在台风通过时“泄压”，避免高耸棚屋的钢木构件因风压过大被破坏（图8）。



图3：伦敦市政厅朝南倾斜的形体



图4：某临湖建筑面向湖面的前倾立面

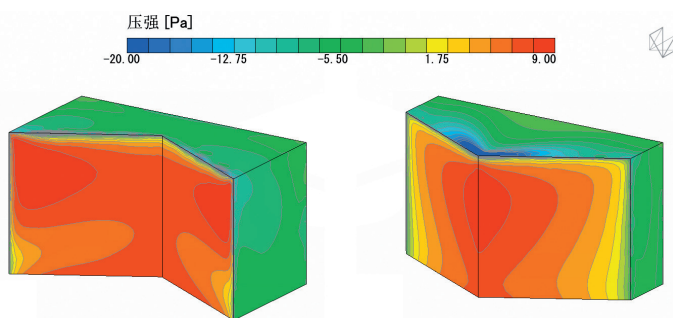


图5：两体量迎风面风压分布三维图示

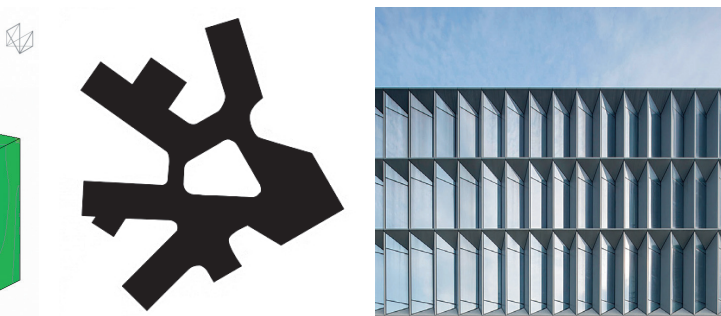


图6：东莞中集总部办公楼平面形态及锯齿状围护结构

2) 孔洞

湿热气候中多孔隙的围护结构塑造了多孔导风的建筑文化。若考虑到日益密集的城市建设环境,建筑形体的多孔特征则可促进建筑内外的气流畅通,尤其是公共空间,如内庭院、中庭与街道、室外开敞空间的气流联通。密集城市环境中建筑大多不能采用舒展的线性体量,紧凑的形体可通过设置孔洞来增大形体与自然气候的接触面。南方民居中天井作为水平分布的孔洞可有效应对湿热气候,引入空气和自然光。对风压通风来说,立体孔洞的作用更大(图9、图10)。穿透建筑的孔洞能缩减风影区面积,促进下风向空气流动;板式高层建筑立面设置的多处孔洞还能减

小立面风压,促进迎风面开窗通风,并有效缓解下冲风效应^①,减轻地面风速,保证行人安全。庭院式建筑贴内院一侧大多采用单侧通风,换气效率不高。庭院宽高比较小时,背风面一侧的建筑体量前后的压差极小,无法形成风压通风。联通庭院的孔洞可以加强庭院与外部空间的空气联通,置换内部空气并引入风压(图11)。主导风迎风立面上内凹的大型孔洞可降低建筑进深,并可形成捕风口,捕捉多个来流风向,增加内部对流通风时段。

3) 局部架空

局部架空是孔洞特征的一种贴地方式。浅进深线性舒展体量因迎风立面阻碍气流而导致下风向场地空气流动性较差

(即风影区较大),底层局部架空是缓解背风面场地弱风环境的常用策略(图12)。深圳万科中心(斯蒂芬·霍尔建筑事务所,2009年)立意于建造一座悬浮于景观花园之上的“水平摩天楼”(图13),大面积的架空使其底部形成了对流通风的良好微气候。在密度城市,近地面的街道空间是空气污染物的聚集地,街道空气流动能够促进空气污染物尽快散失,这关乎公众健康。香港空气流通评估导则(AVA)建议建筑基座打造通风廊道,增加街道步行空间的虚空间以增进空气流通。香港汇丰银行(诺曼·福斯特,1986年)的底层架空设计具有先见之明,供人穿越、聚集的公共空间兼做通风廊道(图14)。

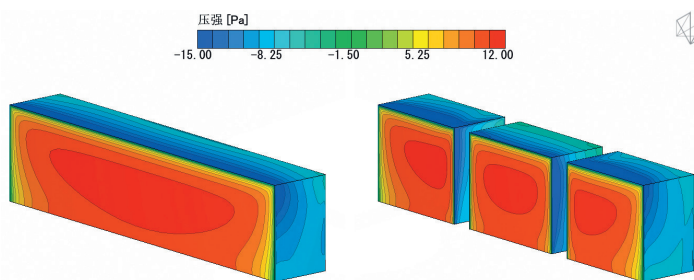


图7: 长条建筑体量与分段处理的迎风面风压比较

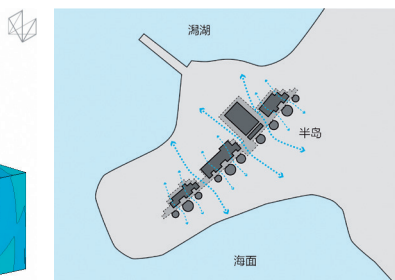


图8: 芝贝欧文化中心的分段形体和当地风玫瑰图

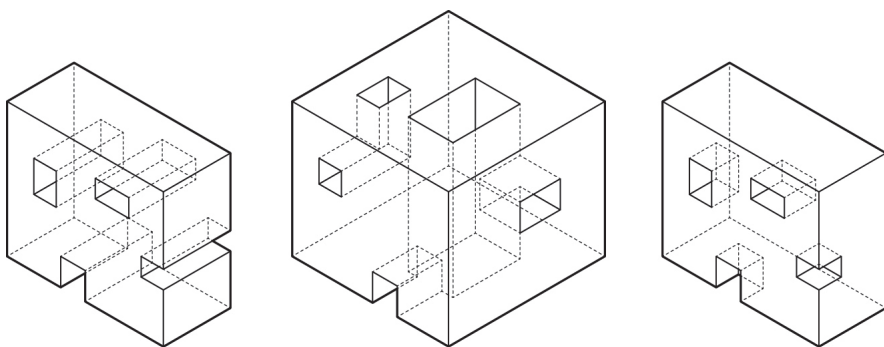


图9: 几种不同的孔洞设置方式



图10: 某庭院式公共建筑立面上的孔洞

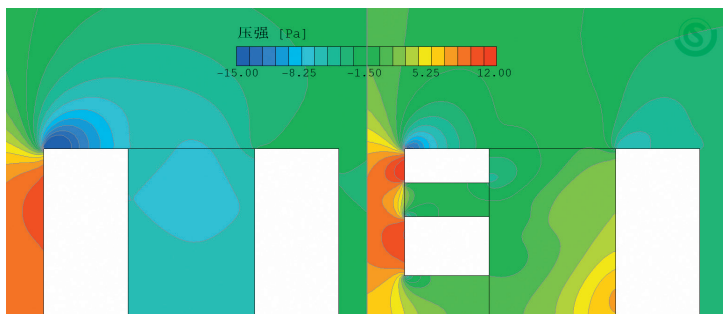


图11: 迎风面有无孔洞时庭院风压对比

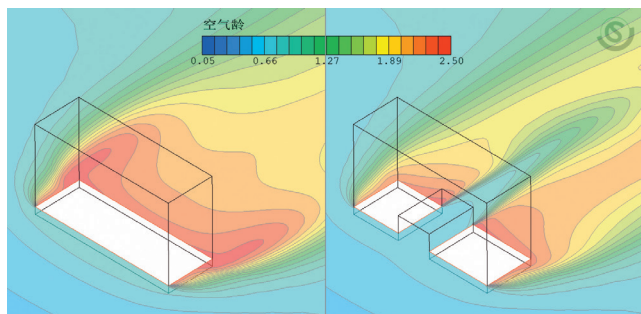


图12: 有无局部架空时建筑下风向1.5m高处空气龄比较



图 13: 深圳万科中心底层架空



图 14: 香港汇丰银行底层架空空间

三、负风压通风的空间形态

1. 负风压通风的机制

要提高建筑表面压差促进室内空气顺畅流动,除了依托正压将室外空气“挤压”进室内,风压通风的主要驱动力也可借助负压将室内空气“抽离”至室外。正压出现在迎风面,而负压出现在背风面及与气流平行的侧面和顶面。在特定场地环境中,如迎风面风压不足或来流风速过大、气温较高,通过形体设计优化加大负压区的吸附力,在出风口为室内空气流动提供主要驱动力,可形成负压风通风。

2. 迎风侧面负压风通风的形态

风压对流通风通常将进风口设置在相对的表面,气流水平穿越室内空间。迎风面和背风面是最常见的设置开口的立面。在常年风大的空旷地区,建筑迎风立面开窗会引入高速气流,导致室内过于干燥,造成人体不适并影响工作。前置遮挡物挡风(如构筑物或密集种植的树木)可减小迎风立面开口处风压。如果主导风强劲且风向单一,可通过形体优化形成侧面较大的负压以抽离室内空气。

马提尼克岛^⑩西岸的安德烈斯学院校长办公楼(克里斯蒂安·豪维特和杰罗姆·努维尔/Christian Hauvette & Jerome Nouel, 1994年)海拔较高,常年有较强海风吹过。为避免强大风压进入室内形成急促穿堂风,北立面与来流风呈 15°

夹角^⑩,并在北侧设置两个体量来挡风。建筑南立面呈弓形外凸,以较小的山墙面迎向海风。该形体和朝向设置使侧面形成大片低压区,为办公室内部热空气吸出提供动力(图15)。中间布置的5个庭院通过连接南立面的廊道排空内部空气以形成负压,从临近办公空间抽出室内空气并排出。

侧面负压抽离式自然通风再现了飞机机翼的空气动力学原理应用:机翼横截面不对称,机翼顶面的气流较底面速度加

大,使气压减小,上下压差形成克服飞机重力的“升力”。依赖稳定来向的强风环境,侧面负压抽离式自然通风需优化形体和朝向:将梭形平面的尖端迎着主导风,一条长边与主导风呈较小夹角以削弱来流风正压,另一条长边经形体优化后使气流加速,从而产生较大负压,这成为驱动室内换气的主要动力。这与常见的长边垂直主导风的布局形成反差(图16),为相同强风环境中的建筑自然通风提供了示范。

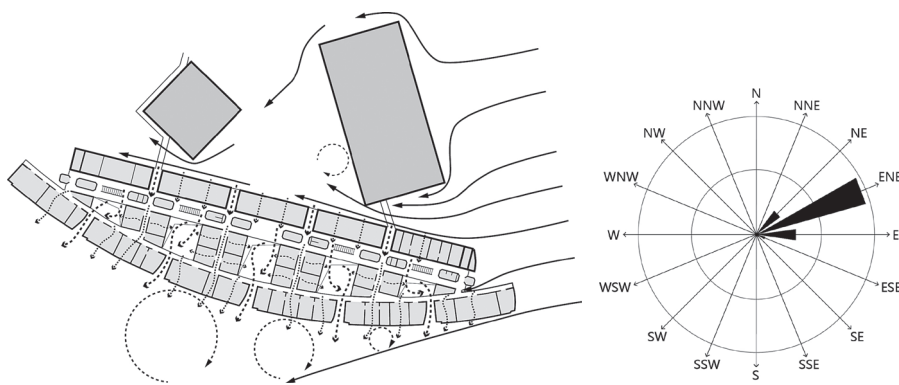


图 15: 安德烈斯学院校长办公楼平面通风组织及当地风玫瑰

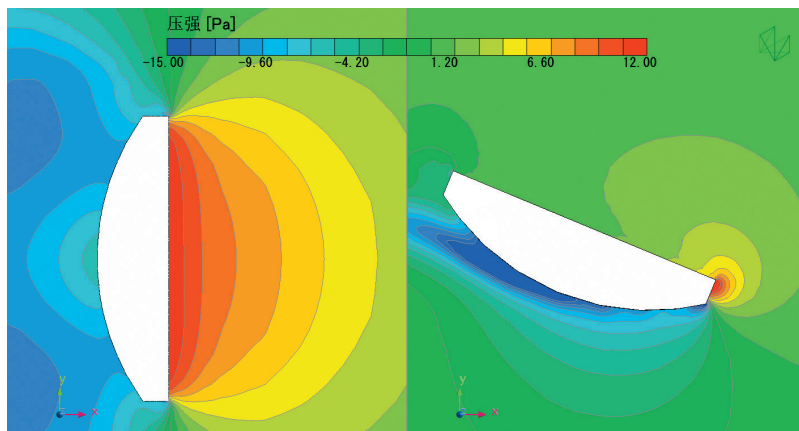


图 16: 两种应对风向的布局中梭形体量表面风压比较

3. 屋顶负压通风的形态

当迎风面的窗无法获得足够风压时, 屋顶设置捕风器 (Wind Catchers) 可以捕捉微风, 常见形式是北非、西亚和南亚传统民居使用的高出屋面的捕风塔^⑭ (Baudgeer)。这是正风压通风的一种方式, 将高处气流产生的水平风压转折后竖直向下推动室内空气流动 (图 17 左)。这种捕风方式结合水的蒸发降温效应, 适用于干热气候区, 在湿热地区的民居中鲜见。平屋顶建筑的屋面上部为负压, 迎风墙面和屋面转折处负值最大; 坡屋顶的负压极值出现在屋脊处, 迎风一侧的屋面将气流汇集至此处形成高速风, 利用文丘里效应^⑮ (Venturi effect) 产生负压吸附力 (图 17 右)。在负压极值处开口可为室内空气流动提供排风动力, 这与干热地区风塔捕风有本质区别。

在密集建成环境中, 建筑遮挡导致迎风面正压不足或为负压, 但屋顶上方风速不受影响, 这为风压通风提供了新的动力选择。屋顶负压通风需优化屋顶形态, 以保证屋顶开口处有足够的负压吸附力带动室内空气整体流动。文丘里管的形态是常用设置, 合适朝向的坡屋面结合顶部架高的气动翼板将气流通过的截面剧烈缩小, 产生相对较大的气压降低。此“文丘里屋顶”^⑯可独立应用于面积较小的建筑, 也可以呈点状或线状单元分布于大体量建筑的屋面 (图 18), 多处布局的排风口使负压通风不受平面进深限制。屋顶设排风口导致室内气流上升并排出, 因此可以结合热压通风, 形成风热压动力的协同^⑰; 或将迎风面正压和屋顶负压结合, 共同驱动迎风侧室内空间的空气流动。

巴塞罗那普莱尔玻璃厂 (Cristalleries Planell) 改建的市民中心 (H 建筑师事务所, 2016 年), 屋顶设 4 个玻璃覆盖的坡屋面 (图 19), 利用太阳能烟囱提供的负压吸附力与高空负压合力抽取室内并道的热气。此建筑平面进深不大, 但为“文丘里屋顶”点状分布提供了示范。汉诺威世博会 26 号展厅^⑱ (托马斯·赫尔佐格,

1996 年) 由南低北高的单坡屋顶单元并联形成屋面 (图 20), 3 个屋脊设长条状带可调节叶片的开口, 上方水平翼板配合倾斜屋面使气流加速, 为超大展厅空间排风提供自然动力。该高大空间的屋顶排风示范可借鉴应用于多层建筑线性中庭的顶部。

因屋顶负压提供室内空气流动的主要动力, 进风口布置相对自由, 不必位于迎风面, 宜靠近干净、阴凉处的空气源, 为室内供给新鲜凉爽空气。若室外气温适宜, 外围空间可在立面开窗, 引入气流。但中心位置的空间无法通过开窗获得室外空气, 进风通道需另辟蹊径。鉴于屋顶负压抽离式通风中空气向上流动并排出的特点, 借鉴我国西南及东南亚地区常见的干栏式建筑底部提供凉爽空气的智慧做法, 并参考南方民居冷巷阴影时间长、广

布蓄冷材质的设置, 进风口可布置于近地面或建筑底面, 经底层架空、下沉庭院、地道、地下室等方式为进入室内的空气预冷, 冷空气通过竖井向上输送至各层, 水平流经使用空间、带走废热空气后进入排风井, 向上被吸附至“文丘里屋顶”流出 (图 21)。此处的排风井可以是专供空气流动的井道, 也可以是兼顾自然采光的小型中庭。借鉴大体量建筑平面单元竖井式热压通风^⑲的策略, 平面上的空间区域配合送排风井道及“文丘里屋顶”形成气流线路完整的通风单元, 单元在水平方向复制可扩大使用空间 (图 22), 靠近的风井可以合并。在无内部热源工况下, 图 23 显示了两个通风单元气流组织的可行性, 但背风侧底层空间出现了从排风井流向送风井的逆流。改进措施是底部加装小型机械

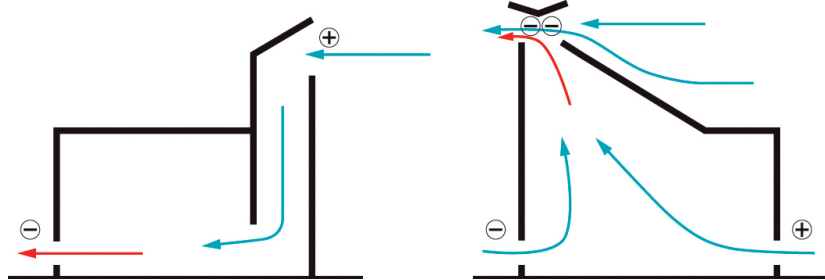


图 17: 捕风塔正风压动力和屋顶负压动力的区别

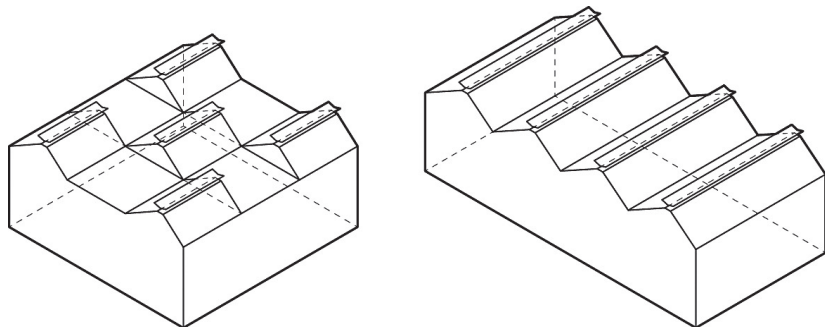


图 18: 大进深建筑中“文丘里屋顶”的点状和线状分布



图 19: 普莱尔玻璃厂市民中心

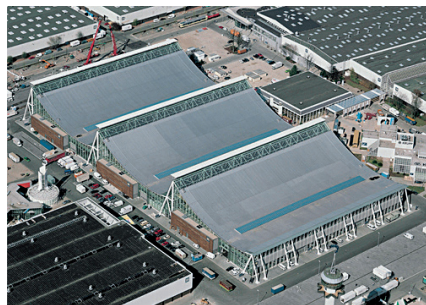


图 20: 汉诺威世博会 26 号展厅

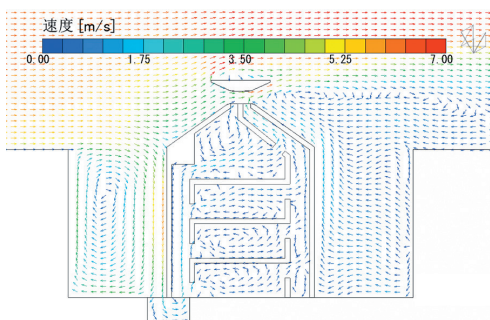


图 21: 屋顶负压抽离式通风的气流矢量图

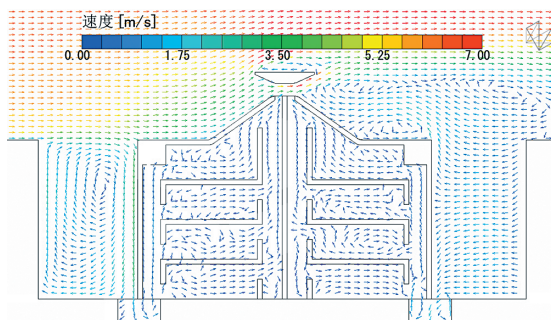


图 23: 两个通风单元的气流组织

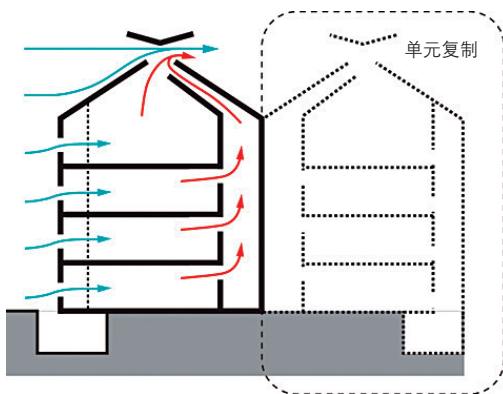
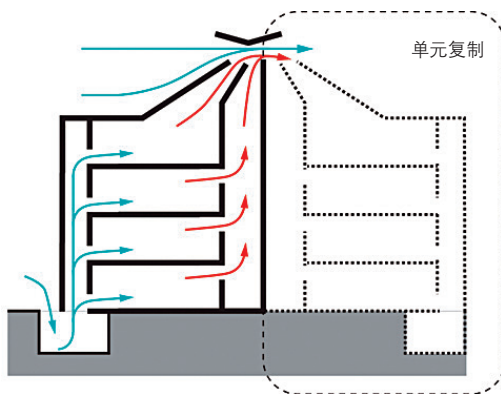


图 22: 两种气流空间组织示意及单元复制



辅助送风, 避免逆流出现, 并结合热浮力弥补顶部负压风压动力的不稳定。因驱动力来自屋面, 建筑的自然通风朝向不受限制, 但“文丘里屋顶”宜根据主导风向规划朝向; 若风向多变, 点式“文丘里屋顶”可设为四坡屋顶, 将多个方向的来流风汇聚至排风口处, 使其加速通过。

四、结语

在适宜时节, 风压通风提供了降低室内热环境调控能耗的优先选项, 优化空间形态对风压通风介入室内热环境调控具有决定性意义。从“用”与“防”两个角度来看, 阻风蓄压和导风泄压的形态策略可对应于不同季风来向, 为引入凉爽空气或屏蔽、疏导冷风提供了最基本的形体参照。这两种形体优化策略为城市环境中促进建筑风压通风及周边空气流动, 或为常年风大空旷区域中的建筑避免风害提供形态解决方案。负压通风的研究完善了风压通风的内涵, 从惯常研究中不受重视的侧面和顶面寻找室内空气流动的驱动力, 探讨强风地区大进深平面风压通风的可行性, 多样利用场地风力资源以形成新的气流

组织模式, 激发空间组织创新的潜力。本文提供的空间形体优化策略以空气动力逻辑建构空间形态, 推动适应不同场地风环境的空间节能设计探索。

注释

- ① 一般民用建筑中用于热环境调控的供热通风与空调系统能耗占建筑运行总能耗的比例最高, 见参考文献 [1]。
- ② 讨论建筑表面的正负压时, 设定的前提是室内空间为一个标准大气压, 高于此值为正压, 低于此值为负压。负压值越大, 意味着低于标准大气压的程度越高。
- ③ 钝体 (bluff body) 是相对于流线体 (streamlined body) 而言的, 此区分基于流体力学中物体在流体中运动时受的阻力与形状的关系。流线体一般前圆后尖、表面光滑、没有大的起伏和尖锐棱角。建筑物多为钝体, 对气流有阻力。
- ④ 单侧通风指空气进入内部空间后从同侧的界面排出。单侧通风既受室外风压驱动, 也能由室内外温差引起, 后者属于热压通风。
- ⑤ 朝向选择的首要原则是冬季争取较多的日照, 夏季避免过多的太阳辐射热, 因此《民用建筑绿色设计规范》(JGJ/T 229—2010) 对我国多数城市建筑的建议朝向是面南或南偏东。合理朝向的另一原则是利于自然通风, 该规范推荐建筑的朝向与夏季主导季风方向控制在 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间, 这与日照

导致的朝南或南偏东朝向基本无冲突。

⑥ 地区或市域风玫瑰图反映的是一个地区风气象的一般情况, 风信息的测定、收集选取的地点通常是机场等空旷区域, 但地形、地面构筑物等会引起局地气流的变化, 导致风向、风速改变, 因此代表整个城市区域风信息的市域风玫瑰图不能完全代表目标建筑附近的风场信息。见参考文献 [9]。

⑦ 室内隔断和家具摆设通常是建筑内部空气流动的阻碍物。一般来说, 室内阻碍物越少, 越容易促进空气流动。

⑧ 根据流体力学中的伯努利原理 (Bernoulli's principle), 无黏性流体速度增加时, 流体的压力能或势能总和将减少。其本质是流体的机械能守恒: 动能 + 重力势能 + 压力势能 = 常数。

⑨ 局地风是小尺度区域内热力差异形成的空气流动, 包括海陆风、地形风、城乡风等热流动。

⑩ 该建筑位于南太平洋小岛新喀里多尼亚 (New Caledonia), 属热带海洋性气候, 凉爽月份平均气温为 20~22℃, 炎热月份平均气温为 27~28℃, 常年相对湿度 70%。高温高湿的气候使得空气流动成为保持空间凉爽和干燥最有效的方式, 建筑自然通风成为必然选择, 但必须面对特定时节的台风。

⑪ 气流遇到建筑物时会在建筑 2/3 高度处分为往上下和左右分离的风。对于高层建筑, 迎风面上的风受建筑物表面下部低压区的吸引, 会变成从上往下冲的劲风, 这被称作下冲风效应 (downwash effect)。下冲风跟街道的水平向风相互影响, 形成的复杂湍流对街道行人和非机动车行驶有很大的危害。

⑫ 法属马提尼克岛 (Martinique) 位于西太平洋加勒比海, 属热带雨林气候, 一年分干季和雨季, 月平均气温 24~27℃, 盛行东北季风。

⑬ 见参考文献 [19]。

⑭ 干热地区民居设置突出屋面的风塔, 引入高速气流以推动室内空气流动, 内部设水罐或底部水池辅助降温。有的风塔兼具捕风与排气功能。伊朗亚兹德 (Yazd) 地区的风塔内设多个竖直通道, 既能捕捉多个方向的风, 也可在无风时段承担排风功能, 形成反烟囱效应和烟囱效应的综合。

⑮ 文丘里效应, 即高速流动的流体附近压强减小, 从而产生吸附作用。利用该效应可制作“文丘里管”, 广泛应用于工业领域。利用文丘里效应促进建筑自然通风的应用详见参考文献 [21]。

⑯ 借鉴“文丘里管”的命名, 坡屋面结合导风翼板形成文丘里效应以提升排风效率的建筑屋顶形态可称为“文丘里屋顶”, 该命名能表达该自然排风系统的原理和核心形态特征。见参考文献 [9]。

⑰ 就使用自然通风的某一固定空间而言, 风压和热压动力可以在不同时段分别作用, 也可以在同一时间

共同作用, 推动室外空气进入室内及室内空气的排出。见参考文献 [21]。

⑱ 该展厅长 220m、宽 116m, 使用机械送风与自然排风相结合的运行模式使空调系统耗能减少 50%。参见: Herzog T, Schrade H J, Schneider R. 2000 年德国汉诺威世博会 26 号展厅 [J]. 城市环境设计, 2016 (6): 21-29.

⑲ 见参考文献 [8]。

参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2014[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [2] 朱颖心. 热舒适的“度”, 多少算合适?[J]. 世界建筑, 2015 (7): 35-37.
- [3] 弗朗西斯·阿拉德. 建筑的自然通风——设计指南[M]. 李琨杰, 李苑, 李紫薇, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [4] AWBI H B. 建筑通风[M]. 李先庭, 赵彬, 邵晓亮, 等译. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 275.
- [5] CIBSE. Energy efficiency in buildings[R]. London: the Chartered Institution of Building Services Engineers, 1998.
- [6] 林宪德. 绿色建筑——生态·节能·减废·健康[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 51-77.
- [7] 夏冰, 陈易. 建筑形态创作与低碳设计策略[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 42.
- [8] 陈晓扬. 大体量建筑的单元分区自然通风策略[J]. 建筑学报, 2009 (11): 58-61.
- [9] 吴国栋. 自然通风导向的城市公共建筑形体与空间组织设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2021: 29-32, 72.
- [10] 刘加平, 谭良斌, 何泉. 建筑创作中的节能设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 39.
- [11] 陈晓扬, 仲德崑. 冷巷的被动降温原理及其启示[J]. 新建筑, 2011 (3): 88-91.
- [12] 黄志祥, 李丽, 赵立华, 等. 不同建筑密度及容积率下架空层的设置对自然通风影响的量化分析[J]. 暖通空调, 2016 (9): 124-127.
- [13] 刘姿佑. 基于院落风环境的多层围合式建筑设计策略研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [14] 吴国栋, 韩冬辰, 张军学. 高层办公建筑自然通风的风廊空间设计研究[J]. 建筑学报, 2023 (2): 117-122.

[15] 姚润明, 昆·斯特摩司, 李百战. 可持续城市与建筑设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 224.

[16] WU Y-C, YANG A-S, TSENG L-Y, et al. Myth of ecological architecture designs: Comparison between design concept and computational analysis results of natural-ventilation for Tjibaou Cultural Center in New Caledonia[J]. Energy and Buildings, 2011, 43 (10): 2788-2797.

[17] 陈蕴, 艾侠, 杨铭杰. 绿色总部——万科中心设计解读[J]. 建筑学报, 2010 (1): 6-13.

[18] NG E. Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities-air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong[J]. Building and Environment, 2009, 44 (7): 1478-1488.

[19] 大卫·劳埃德·琼斯. 建筑与环境——生态气候学建筑设计[M]. 王茹, 贾红博, 贾国果, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 104.

[20] G·Z·布朗, 马克·德凯. 太阳辐射·风·自然光: 建筑设计策略[M]. 常志刚, 刘毅军, 朱宏涛, 译. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 188.

[21] 吴国栋, 韩冬青. 公共建筑空间设计中自然通风的风热协同效应及运用[J]. 建筑学报, 2020 (9): 67-72.

图片来源

图3: [EB/OL]. <https://www.fosterandpartners.com/projects/city-hall/>.

图4: [EB/OL]. <https://www.arup.com/services/buildings/sustainable-buildings-design>.

图6: [EB/OL]. <https://www.goood.cn/cimc-headquarter-office-building-china-by-ccdi-dongxiying-studio.htm>.

图13: [EB/OL]. <https://www.arup.com/zh-cn/projects/vanke-centre>.

图14: [EB/OL]. <https://www.fosterandpartners.com/projects/hongkong-and-shanghai-bank-headquarters/>.

图19: [EB/OL]. https://www.archdaily.com/882489/cristalleries-planell-civic-center-h-arquitectes?ad_medium=gallery.

图20: [EB/OL]. <https://thomasherzogarchitekten.de/en/en-1996-halle26>.

其余图片均为作者拍摄、绘制