doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.066

风环境性能导向的寒冷地区商业建筑入口外部形式设计

任 蕾[1a,1b],曲冠华[1a,1b],刘 刚[1a,1b],原 野[1a,1b,2]
(1.天津大学 a.建筑学院;b.天津市建筑物理环境与生态技术重点实验室,天津 300072;2.新加坡国立大学设计与环境学院,新加坡 117566)

摘要:商业建筑入口冷风的高渗透量对建筑运行能耗和人员热舒适造成了极大影响。为提升入口抵抗冷风渗透的性能,文中分析了寒冷地区商业建筑4种典型入口外部形式,并基于FLUENT平台的CFD数值模拟,对各类入口进行多风向的冬季风环境仿真计算。同时,提出“入口综合速度”作为入口风环境性能指标,以评价各入口类型在不同风向条件下的风环境性能。结果表明,入口迎风时,应优先选择凹入口,不宜采用平入口;入口背风时,应优先选择半凸近入口,不宜采用半凸远入口。此外,主导风向为90°、180°和270°的条件下,入口形式可任意选择;而风向多变条件下,凹入口风环境性能最佳,平入口最差。为此,提出了不同风向下的入口外部形式优选策略和提升方法。

关键词:商业建筑;入口;空气渗透
中图分类号:TU119+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2025)01-054-12

Wind-environment-performance-oriented design of exterior entrance forms for commercial buildings in cold regions

REN Lei[1a,1b], *QU Guanhua*[1a,1b], *LIU Gang*[1a,1b], *YUAN Ye*[1a,1b,2]
(1a. School of Architecture; 1b.Tianjin Key Laboratory of Architectural Physical Environment and Ecological Technologies, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China; 2. School of Design and Environment, National University of Singapore, Singapore 117566, Singapore)

Abstract: Air infiltration through building entrances significantly affects the energy consumption and occupant comfort of commercial buildings. To improve the resistance of entrances to air infiltration, this study identifies and evaluates four typical entrance exterior entrance forms of commercial buildings in cold regions. With utilizing the FLUENT platform, multi-directional wind simulations are conducted to assess the performance of these entrance types. A novel metric, “comprehensive velocity” , is introduced to quantify and compare their effectiveness under different wind conditions. Results show that under windward conditions, a concave entrance is more effective than a flat entrance, whereas under leeward conditions, a semi-convex-near entrance is preferable to a semi-convex-far

收稿日期:2021-12-19 **网络出版日期:**2022-04-21
基金项目:“十三五”国家重点研发计划资助项目(2016YFC0700200);高等学校学科创新引智计划资助项目(B13011)。
Supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFC0700200) and the Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities (B13011).
作者简介:任蕾(1994—),女,博士研究生,主要研究方向为建筑性能化设计,(E-mail) labelren@qq.com。
通信作者:刘刚,男,教授,主要研究方向为绿色与低能耗建筑,(E-mail) lglgmike@163.com;曲冠华,男,博士研究生,主要研究方向为绿色与低能耗建筑,(E-mail)quguanhua93@126.com。

entrance. When the dominant wind directions are 90°, 180° and 270°, any entrance form may be selected; however, under variable wind directions, the concave entrance demonstrates the best performance, with the flat entrance performing the worst. Based on these findings, this study proposes optimization strategies and improvement methods for the exterior design of entrances to enhance their performance under diverse wind conditions.

Keywords: commercial buildings; entrance design; air infiltration

寒冷地区采暖季较长，温度低且风速大，公共建筑普遍存在入口冷风渗透的问题，导致室内温度分布不均匀，对建筑使用者的热舒适度产生不利影响[1-2]。研究发现，空气渗透是影响冬季室内供暖负荷的重要因素[3-4]。公共建筑的主要空气渗透来源是门和可开启窗扇[5]。由于商业建筑的窗扇可开启率较小，且开启频率低，入口成为商业建筑冷风入侵的主要途径。相比办公建筑入口使用时间集中的特性，商业建筑作为人员高流动性的公共建筑，其入口难以保持关闭状态，导致冷风向室内持续渗透。基于上述原因，降低入口的冷风渗透对商业建筑节能和提升使用者热舒适至关重要。已有研究限制入口冷风渗透通常从优化入口空间设计、布局以及附加防风装置入手。入口空间优化的研究主要针对入口的朝向、位置、平面形式和围护结构提出设计策略，包括建筑主入口尽量规避冬季主导风向、制造室内外高差、提升外墙保温性能以及设置多重门斗等方法[6-7]。然而，大型商业建筑不可避免地存在多入口现象，现有研究却并未准确定义“规避”的概念，也未提出无法规避冬季主导风向时入口空间的相应设计方法。此外，商业建筑以营利为第一优先级，为了鼓励顾客进入建筑，业主更倾向于在设计和运营中，使入口空间无遮挡、易于开启且流线简洁的入口设计方案。对于附加入口防风装置以阻挡冷风渗透的研究，主要从风幕和防风帘两方面展开，探索了多种类型的防渗透风幕，并讨论了风幕的出风温度、出风角度和人员流动等因素对防风性能以及能源效率的影响[8-9]。结果表明，当风速达到 1.76 m/s 时，顶送式热风幕的下部就会被侵入风击穿，导致风幕对冷风渗透的阻挡效果明显降低[10]。笔者在实地调研中发现，已有商业建筑存在采用侧吹型热风幕以防止风幕下部击穿的情况，然而侧吹型热风幕与人员距离过近时，高速热风对人员热舒适度会产生较大的影响。为了保证空气能够高速喷出，无论何种热风幕均不设置过滤系统，送入的空气携带大量室外污染物颗粒，对室内空气清洁和人员健康带来不利影响。另一方面，入口防风帘的使用在一定程度上影响了入口空间的视线通透性，造成磕碰等安全隐患，尤其对老年人和儿童有更高的风险，并且防风帘与人体频繁接触也会带来一定的公共卫生隐患。

综上所述，目前入口设计缺乏量化明确的指导策略，防风装置存在固有弊端。因此，具体的入口空间设计策略缺失是亟待解决的问题。商业建筑的入口位置受到人流来向、街区方位和地块形状的限制，通常无法完全避开当地冬季主导风向。同时，出于人流疏散的要求，商业建筑在多个方向分散布置多个入口，实际项目中难以达到所有入口都避开主导风向的理想效果。为了使入口界面风速更小，需要分析不同来流方向下入口外部形式的选择和优化方法。考虑不同来流方向下的入口外部形式对入口界面风速的影响，即当入口与冬季主导风向呈某种角度时，提供该入口的空间形式优选策略，避免可能出现的设计缺陷，在满足设计灵活度的前提下，提升建筑抵抗入口冷风渗透的空间属性，充分发挥建筑空间性能的潜力。

1　研究方法

1.1　典型模型提取

为了提升研究结果的泛化性，笔者通过实地调研和图纸梳理，对寒冷地区 24 栋商业建筑的 75 个入口外部形式进行了特征提取，总结出商业建筑入口的 4 个典型模型，包括平入口、凹入口、半凸近入口和半凸远入口。由于凸入口形式会使整个建筑主体后移，压缩了功能空间，实际工程中应用较少[7]，文中不予讨论。针对上述 4 种入口类型进行分类统计，各入口形式纳入统计范围的空间参数如图 1 所示，对已提取的空间参数在各自维度的均值±标准差范围内取平均值[11]，以获得典型空间参量，建立寒冷地区商业建筑四类入口的典型模型，入口的开启扇和雨棚的尺寸为固定值。基于已有文献的寒冷地区商业建筑典型模型[12]，选取既有存量

最多的，即1:2矩形平面的典型模型作为入口典型模型的主体建筑载体，建筑尺寸为150 m×100 m×23 m。整合后的入口典型模型如图1所示，其中标注的尺寸数据如表1所示。

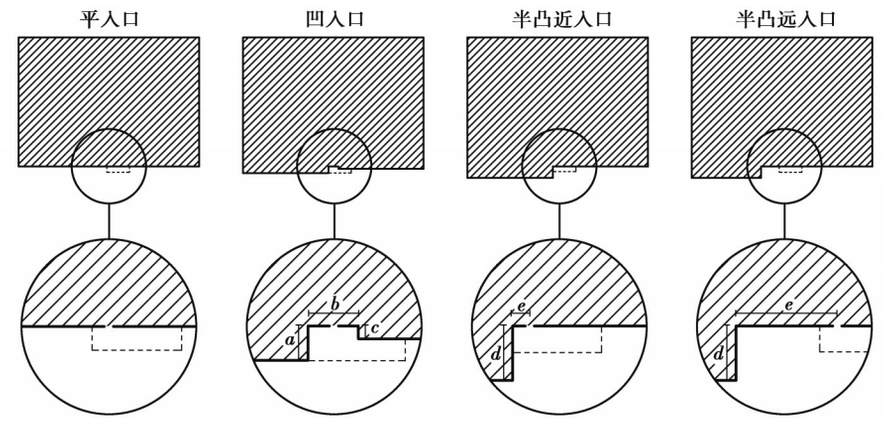


图1 入口典型模型平面图

Fig. 1 Plans of typical entrance models

表1 入口典型模型尺寸数据

Table 1 Size of typical entrance models

参数	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*(近)	*e*(远)
尺寸/m	5.70	8.40	2.10	9.00	2.40	17.00

1.2 风环境性能模拟

文中采用计算流体力学方法(computational fluid dynamics, CFD)对提取的典型模型进行室外风环境仿真计算，依据Gambit和Fluent仿真平台进行网格模型建立和数值模拟，所有模拟均采用相同的模型网格精度、计算精度、仿真物理模型以及仿真数学模型。参照目前通用的室外流场模拟计算域设定方法建立计算域，如图2所示[13]，仿真模型网格精度为0.1 m，所有模拟模型的网格质量指标EquiSize Skew在0~0.4范围内的比例均大于90%。仿真方法为有限体积法，模拟类别为定常流动的牛顿流体稳态模拟，考虑流体黏性。模拟计算精度为二阶迎风，迭代次数1 000次且达到收敛阈值。仿真数学模型选用对墙体周边加强处理的k-ε标准湍流模型以及discrete ordinates辐射模型[14-15]，考虑了太阳辐射和围护结构的影响。此外，仿真物理模型采用boussinesq气体假设(初场与来流的温差和热膨胀系数的乘积远小于1)[16]，通过湍流模型中k和ε的计算结果求解湍流黏度，获得雷诺应力计算结果[17]。文中对寒冷地区风环境边界条件的设置以寒冷地区典型城市——天津的气象参数为例，依据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB50736-2012)中典型年的室外气象参数，选取冬季最多频次风向(北向)距地面10 m高度处的平均风速4.8 m/s，即距地面1.5 m人行高度处平均风速3.04 m/s作为室外来流边界条件，冬季平均风温为−3.65 ℃，计算域初场温度为冬季空气调节室外计算温度−9.6 ℃。仿真模型北侧边界设置为velocity-inlet，其余方向设置为pressure-outlet，内部建筑体块设置为Wall。室外来流采用城市梯度风模型，由于商业建筑多在市区内且周边通常存在既有建筑，所以地面粗糙系数n取值0.24[18]。来流风向以30°为步长，对360°风向偏转角度共12个风向进行模拟计算，如图3所示。

$$V_h = V_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^n , \tag{1}$$

式中：V_h为高度为h米处的室外风速，m/s；V_0为基准高度h_0米处的风速，m/s，通常取10 m高度处风速；n为地面粗糙系数。

为排除室内环境因素对入口风速的影响，将入口界面设置为实体以规避室内外连通模拟导致的误差，入口界面网格分布已通过网格质量检验(面和体网格的扭曲度＜0.97)[19]。入口界面风速源于外部风速条件和建筑室内外压差的共同作用，而入口载流截面因模拟设置的实体界面阻挡导致室外来流的部分动能转化为

压力势能。遵循能量守恒及转换定律，压力势能与动能可相互转化，同时考虑因温度改变导致的空气重度变化和全压在数值上与动压相等的理想条件（静压为 0 Pa），可将静压能等效转化的动能附加于入口界面气流速度进行综合计算 [20]，所得结果即为排除室内影响的入口载流截面风速。

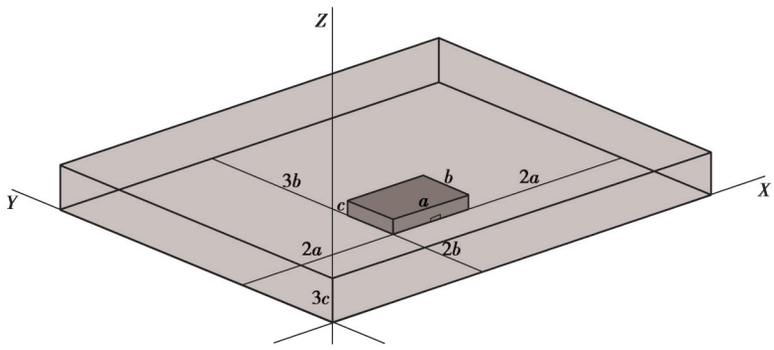


图 2　风环境模拟计算域示意图

Fig. 2　Computing domain for wind environment simulation

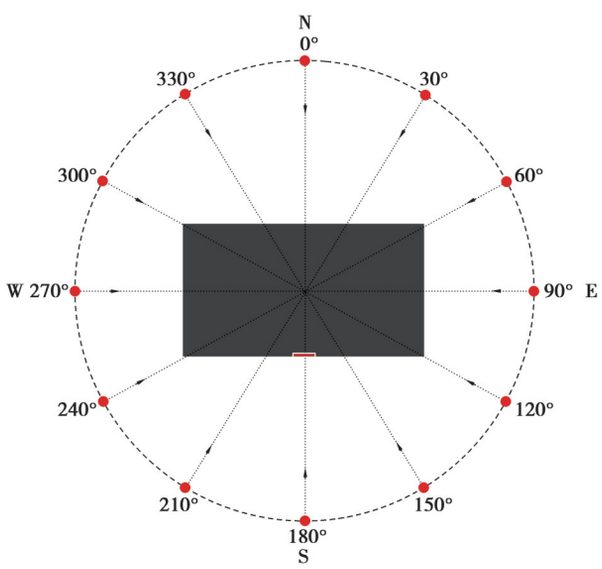


图 3　风环境模拟计算风向示意图

Fig. 3　Wind direction conditions for wind environment simulation

文中基于气体流量计算原理构建入口风环境性能评价指标[21-23]，推导过程如下：

在不考虑温度和压力的前提下，理想气体流量计算方法为

$$Q = V \times F \text{ 。} \tag{2}$$

室外来流受温度场和入口实体界面影响，采用经温度和压力修正的气体流量公式为

$$Q' = V \times F \times (P \times 10 + 1) \times \frac{T + 20}{T + t} \text{ 。} \tag{3}$$

依据式（2）原理将式（3）中 Q' 拆分为入口载流截面风速与载流截面面积的乘积，其中 V_e 为目标参量，命名为入口综合速度：

$$Q' = V_e \times F \text{ 。} \tag{4}$$

经整理后，提出入口风环境性能评价指标——入口综合速度 V_e，以 V_e 作为评价入口外部形式风环境性能的评价量：

$$V_e = V \times (P \times 10 + 1) \times \frac{T + 20}{T + t} \text{ 。} \tag{5}$$

式中：Q为气体流量，m^3/s；Q'为经压力和温度工况修正后的气体流量，m^3/s；F为截流截面面积，m^2；V为入口综合速度，m/s；P为气体在截流截面处的压力，MPa；T为绝对温度，273.15 K；t为气体在截流截面处的实际温度，K。

入口综合速度V_e的相关计算参数取自CFD模拟结果，计算得到V_e的数值可用于入口风环境性能评判，指导入口外部形式选型。通过对比不同工况下V_e的数值浮动，对4种不同入口形式的“薄弱环节”进行挖掘。针对V_e激增的工况，结合入口形式的空间特点进行三维矢量分析，依据气流运动路径和特征运动模式探究极端工况产生的原因及规律，提出入口外部形式的空间优化方法，并模拟验证。在入口形式优选的基础上规避不利的设计要素并提出具体的优化策略，进一步提升入口风环境性能。

2 风环境性能分析

2.1 入口形式对入口综合速度的影响

为获得不同入口形式对入口综合速度V_e的影响关系，对不同入口形式的模拟结果进行对比分析，如图4和表2所示。结果表明，在不同风向条件下平入口的入口综合速度V_e波动最大，极差可达7.8 m/s。平入口的V_e最大工况并非发生在风向角180°的条件下，而是当风向角为120°和240°时，平入口具有最大入口综合速度。对比半凸近入口和半凸远入口，二者的区别只在于入口与墙的距离。2种入口形式在来流风向角180°~210°范围内的入口综合速度数值接近，其原因为入口处于墙体遮蔽范围内，墙体可对这一范围内的来流进行有效阻挡。但在其他风向角条件下，半凸近入口和半凸远入口的入口综合速度存在较大差异，说明墙与入口

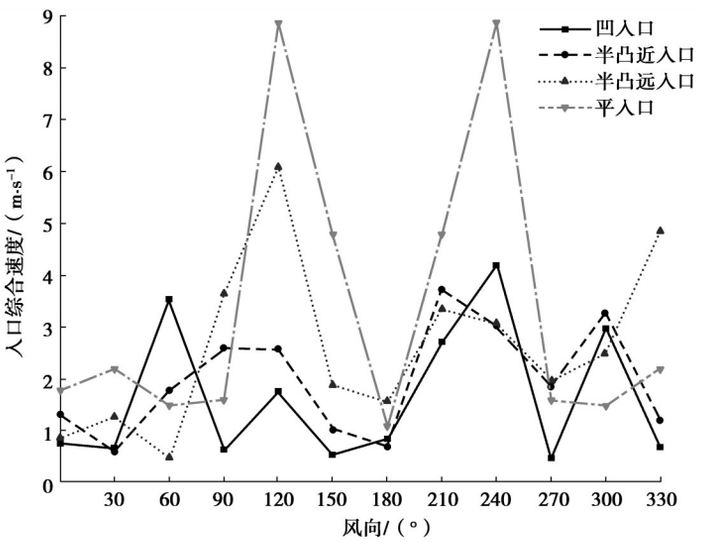


图4 不同入口形式的入口综合速度模拟结果

Fig. 4 Simulation results of entrance comprehensive velocity

表2 不同入口形式的入口综合速度统计结果

Table 2 Statistical results of entrance comprehensive velocity

入口类型	入口综合速度V_e/(m·s⁻¹)	
	平均值	标准差
平入口	3.38	2.72
凹入口	1.63	1.29
半凸近入口	1.95	1.01
半凸远入口	2.61	1.59

的距离对入口抵抗冷风渗透的性能有较大影响,其差异不仅表现在数值,还表现在随风向偏转角度变化的趋势上,入口背风时,二者风速的变化趋势相反。半凸近入口的入口综合速度 V_e 的标准差最小,表明其受风向影响波动最小,风速相对稳定。凹入口随风向角变化产生的风速波动同样较小,风速变化区间与半凸近入口相近,但凹入口的入口综合速度平均值为4类入口形式最低,说明凹入口的风环境性能略优于半凸近入口。综合考虑4种入口形式,凹入口在各风向条件下的入口综合速度平均值最小,平入口的最大。

2.2　来流方向对入口综合速度的影响

室外来流方向对入口综合速度的影响在部分风向角下存在特定的作用规律。对模拟结果绘制雷达图,如图5所示,由图可知,来流偏转角度在0°~30°的范围,以及180°的条件下,各入口形式的入口综合速度 V_e 普遍较其他来流方向更小。除半凸远入口外,各入口形式均在180°风向角的条件下获得最低的入口综合速度,而半凸远入口的 V_e 也降至了较低的水平。来流风向角为120°、210°、240°和300°的条件下,入口综合速度 V_e 呈现较大的数值。值得注意的是,处于背风条件下的入口虽然位于风影区,此时4种入口形式的入口综合速度均值为1.78 m/s。因此,入口即使处于背风条件下仍需要考虑入口外部形式的防风设计。整体分析CFD模拟结果可知,入口综合速度 V_e 的最大值为8.87 m/s,最小值为0.45 m/s,极差可达8.42 m/s。因此,在实际项目应用过程中,结合入口外部形式和特定来流方向的作用规律进行入口形式优选,可挖掘入口抵抗冷风渗透性能的潜力。

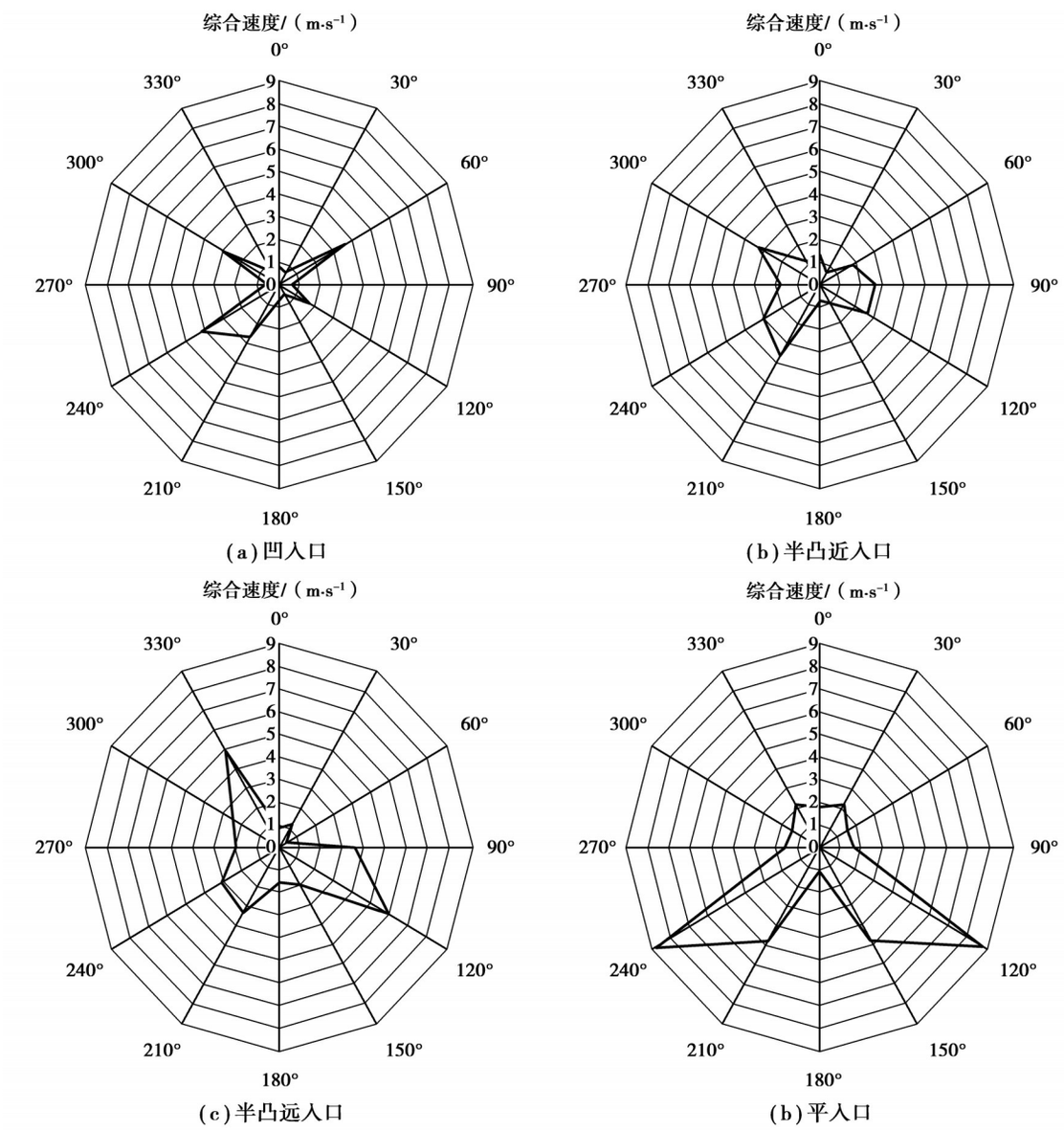


图5　不同来流风向对入口综合速度的影响

Fig. 5　The influence of wind direction on entrance comprehensive velocity

2.3 入口外部形式选型策略

基于不同入口形式和来流方向的综合对比，依据Lawson行人风舒适性评估指标[24]，提出商业建筑入口外部形式选型策略，图6所示为每30°步长范围内，入口风环境性能前2位的入口形式。除图6所示的入口外部形式选型策略外，在主导风向不典型（风向多变）的气象条件下，不同来流方向的风对平入口的入口综合速度V_e影响较大，平均值明显高于其他入口形式，在特定角度下会产生极端工况，不宜选择平入口。凹入口的入口综合速度平均值和标准差明显小于其余入口形式，所以风向多变的条件下选用凹入口会获得明显的性能增益。当入口处于背风条件下，分析图5可知，半凸近入口是以风环境性能为目标的最优选择，凹入口次之，平入口再次，但半凸远入口在330°风向角条件下具有明显风环境缺陷，应进行合理规避。当入口处于迎风条件下，凹入口是最优选择，半凸近入口次之，半凸远入口再次，但是半凸远入口在120°的偏转角度下会出现风环境缺陷，同样应当规避。值得注意的是，凹入口的典型模型为非对称形式，在风向角210°~240°范围内会出现较为不利的风速。此外，4种入口形式在来流偏转角度为90°、180°和270°的条件下无明显风环境性能差别，可任意选择。

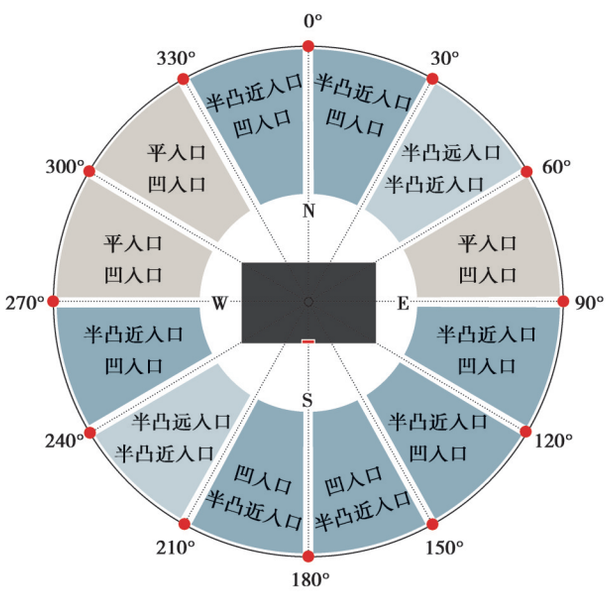


图6 商业建筑入口外部形式选型策略

Fig. 6 Selection strategy of commercial building entrance

3 入口风环境缺陷影响机理与优化方法

3.1 平入口极端工况分析

平入口的极端工况发生在120°~150°和210°~240° 2个风向角度范围内。由于平入口的中轴对称性，仅针对120°~150°的风向角区间进行分析，风向偏转角度为120°和150°的平入口风速矢量结果，如图7所示。风向角为120°时的入口综合速度V_e激增是由于来流被主体建筑的边角劈开，形成2股边角强风，其中1股风沿建筑形成贴附射流并逐渐加速，最终流入入口。偏转角度为150°的来流因平行于入口界面的速度分量较小，其形成的贴附射流速度明显小于风向角120°工况，此时，垂直于入口界面的速度分量较大，受到建筑下冲风的影响而偏转加速，使得150°风向角条件下的入口综合速度V_e仍具有明显的速度增量。通常来说，当建筑迎风时，来流受到壁面阻碍后形成向下反射风，即下冲风。这一规律也可对风向偏转角度为180°时4种入口形式的入口综合速度V_e均处于较低水平做出解释：由于该风向条件下无平行于入口界面的速度分量，从而下冲风的大部分动能只能冲击至雨棚，不会对入口界面的V_e产生影响，该条件下V_e数值普遍较小。

在外部条件允许的前提下，应首先考虑在上述偏转角度范围内尽量避免选择平入口形式。若外部条件有所限制，平入口虽然无可优化的特征空间参数，但可以通过钝化建筑的转角，提高建筑表面粗糙度等措施

加以改善。

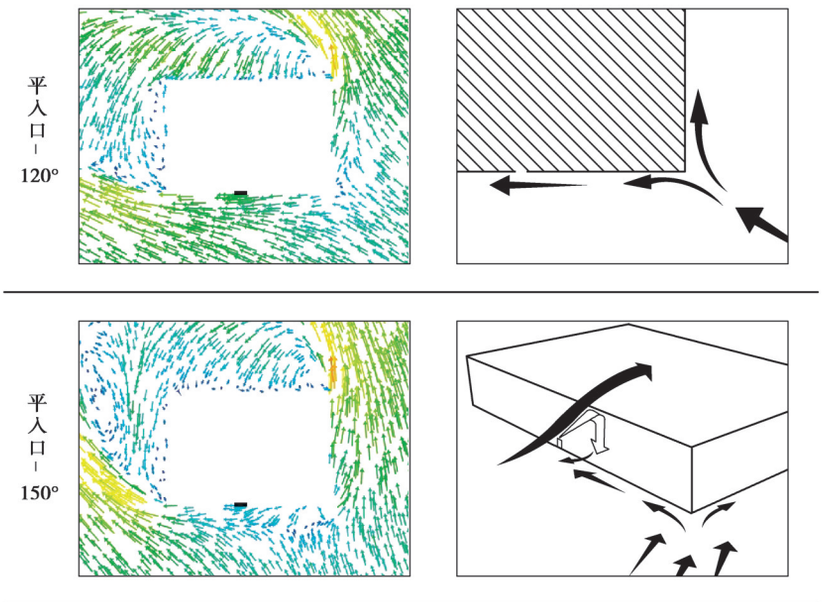


图 7　风向角 120°和 150°的平入口局部矢量结果及示意图

Fig. 7　Vector results of flat entrance with wind directions of 120° and 150°

3.2　凹入口极端工况分析

凹入口的极端工况发生在风向角为 60°、240°和 300°的来流条件下。对于凹入口在 240°风向角条件下风速激增的问题,通过对比 120°和 240°风向条件下的矢量结果发现,凹入口的特征空间变量对其风环境性能有显著影响。提取凹入口的特征空间变量,如图 8 中标注位置所示,分别记作“*a*”“*b*”“*c*”。由于空间参量“*b*”在调研和图纸统计中的数据集中性良好,考虑其与建筑的柱网排布和柱距紧密关联,不易对参量“*b*”进行变动。为了验证“*a*”“*c*”的尺寸对风环境性能的影响,通过调整空间参量“*a*”和“*c*”的比例关系进行模拟对比分析。在凹入口典型模型 *a*:*c* 比值 2.7:1 的基础上,增加 1:2.7、1:1.8、1:1、1.8:1 4 种 *a*:*c* 比例关系的工况,进行模拟结果对比,入口综合速度 V_c 的结果如图 9 所示。

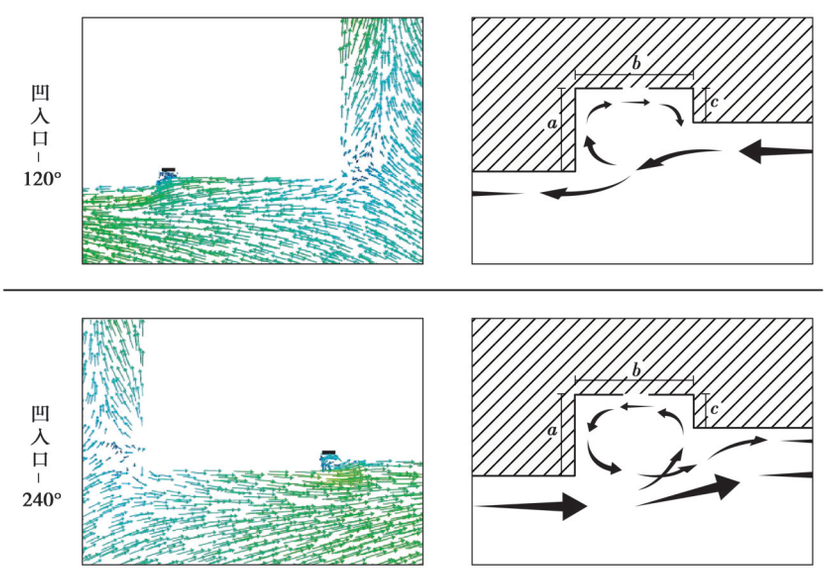


图 8　风向角 120°和 240°的凹入口局部矢量结果及示意图

Fig. 8　Vector results of concave entrance with wind directions of 120° and 240°

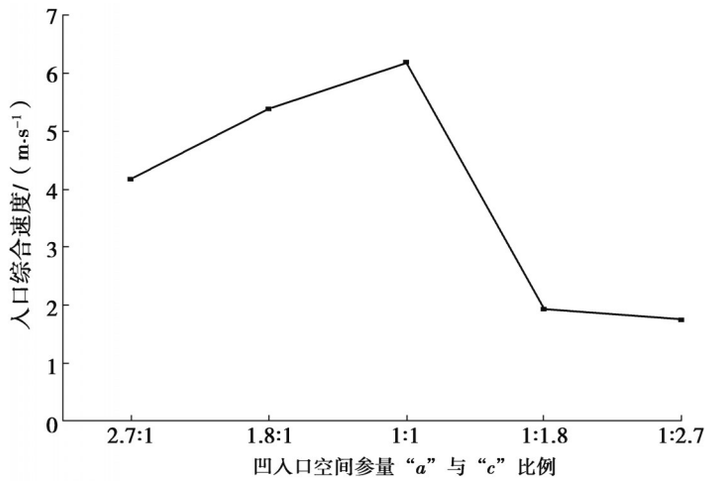


图9 不同a:c比例关系工况下的入口综合速度

Fig. 9 Entrance comprehensive velocity under different a:c ratio

分析可知,临近来流一侧墙体较短时,来流受到对侧较长墙体的阻挡,大部分气流离开入口区域,少部分气流进入入口所在的内凹空间,进而受到加速涡流作用,使入口综合速度增大;当临近来流一侧墙体较长时,来流因墙体阻挡产生局部气压变化而发生偏转,大部分气流进入内凹空间受到局部涡流的加速作用,从而导致入口综合速度V_e比临近来流一侧墙体较短时更大;两侧墙体等长时,进入内凹空间的气流由于空间围蔽性的增强而无法离开,导致气流持续受到加速涡流的影响,产生较其他形式更大的入口综合速度,此时入口风环境性能最差。因此,临近来流方向一侧的墙体尺寸应短于另一侧,在合理的比例关系范围内两侧墙体尺寸差异越大,风环境性能越好。

此外,凹入口处于60°和300°风向角的条件时(见图10),受建筑形体和背风面负压区的影响,气流在边角处发生弯折偏转,进入入口的内凹空间形成涡旋,导致入口综合速度V_e的增大。通过对比二者的矢量结果发现,2种来流条件下气流的运动路径近似对称,入口综合速度V_e的数值差异较小。不难看出,凹入口在背风条件下,入口空间特征参量对其风环境性能无明显影响。

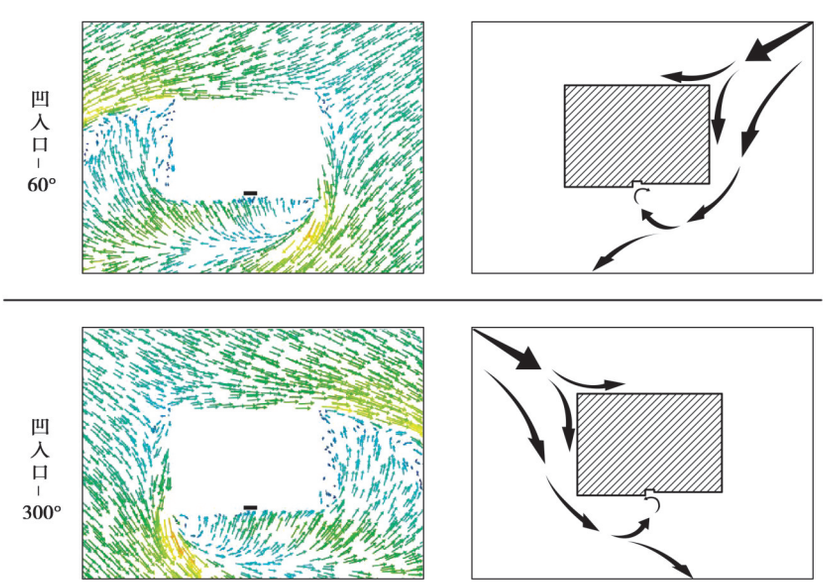


图10 风向角为60°和300°的凹入口局部矢量结果和示意图

Fig. 10 Vector results of concave entrance with wind directions of 60° and 300°

3.3　半凸近入口和半凸远入口的极端工况分析

半凸远入口典型模型东侧与平入口的空间形式相同，并且二者在120°来流条件下均受到建筑主体边角的影响而产生V_e突增的不利工况，由于半凸远入口在风的运动路径上存在具有引导气流作用的墙体，产生局部风压变化而导致贴附射流发生偏转，使半凸远入口在120°来流条件下的V_e值明显小于平入口（见图7）。半凸近入口与半凸远入口的区别仅在入口和外凸墙体之间的距离差异，但二者在风向角为120°和330°条件下的入口综合速度V_e存在明显差异。对比半凸近入口和半凸远入口在风向角120°条件下的的矢量结果发现（见图11），二者的气流运动路径相同，均受建筑形体的影响而发生偏转，但半凸远入口的入口界面位于存在贴附射流的区域，而半凸近入口的入口位置则靠近凸出的墙体，处于气流偏转形成的死流区。根据矢量图中气流运动路径推论，风向角为120°的条件下，半凸入口与墙体之间的距离不大于墙体外凸的长度时，入口综合速度V_e较小（见图12）。

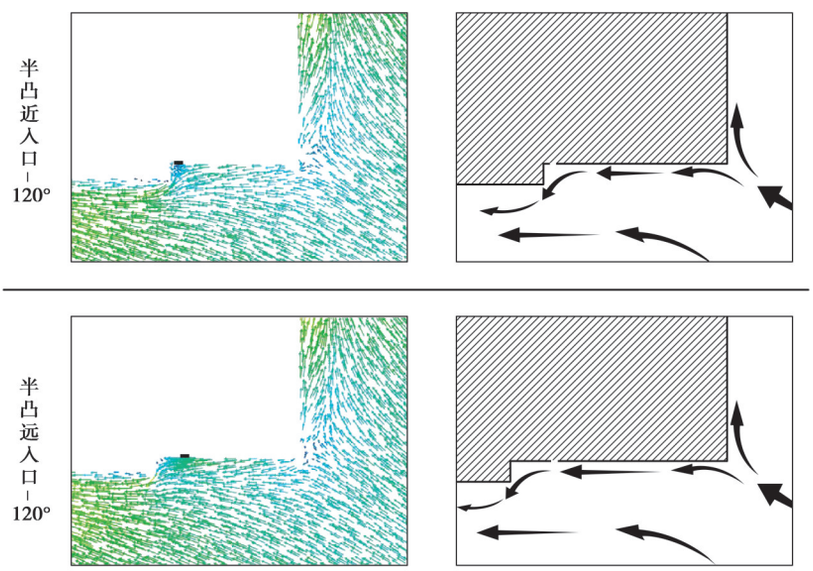


图11　风向角为120°的半凸近入口和半凸远入口局部矢量结果和示意图

Fig. 11　Vector results of semi-convex near and far entrance with wind directions of 120°

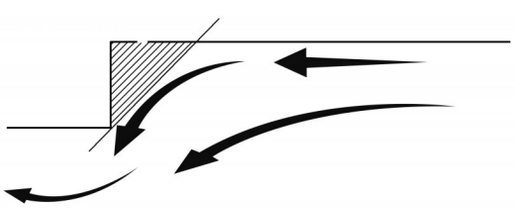


图12　半凸入口理想位置示意图

Fig. 12　Ideal form of semi-convex entrance

对比半凸远入口和半凸近入口在风向角为330°条件下的矢量结果可知，二者的气流运动路径与前述规律相同。此时，半凸近入口仍位于死流区内，使其入口综合速度V_e明显小于半凸远入口（见图13）。综合考虑迎风和背风2种情况，若选用半凸入口形式，应加强关注入口与墙体的位置关系，入口位置距离墙体越近，入口风环境性能越好。

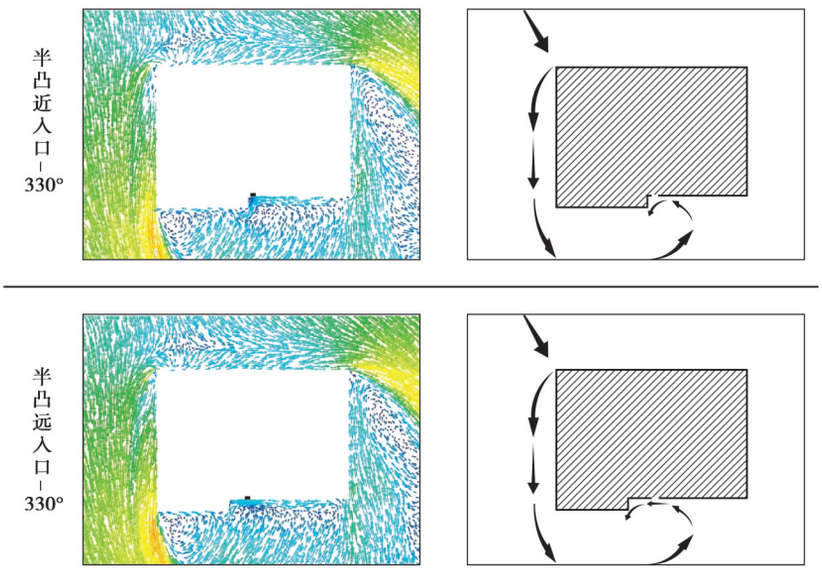


图13 风向角为330°的半凸近入口和半凸远入口局部矢量结果和示意图

Fig. 13 Vector results of semi-convex near and far entrance with wind directions of 330°

4 结 论

文中通过对4种典型商业建筑入口形式的风环境模拟分析,提出不同风环境条件下入口外部形式的选型和优化策略。

入口外部形式选型策略如下:

1)入口处于迎风条件时,风环境性能由高到低依次为:凹入口>半凸近入口>半凸远入口,不宜采用平入口;

2)入口处于背风条件时,风环境性能由高到低依次为:半凸近入口>凹入口>平入口,不宜采用半凸远入口;

3)入口处于多变的风向条件时,凹入口风环境性能最佳,平入口最差;

4)来流风向角为90°、180°和270°的条件下,入口形式可任意选择。

入口风环境性能优化策略如下:

1)平入口主要受到平行于入口界面来流分量的影响,其风环境性能可以通过钝化建筑的转角和提高建筑表面阻尼的方式加以改善;

2)凹入口主要受到内凹空间涡流影响,建议临近来流侧墙体长度应小于远离来流侧墙体,并且凹入口两侧墙体在合理的比例变化范围内,尺寸相差越大则风速越小;

3)半凸型入口的风速主要取决于入口与凸出墙体的位置关系,入口与墙体的距离建议小于墙体的凸出长度,并且入口与墙体的距离越近,入口在所有风向角条件下的风环境性能会越好。

参考文献

[1] Liu X C, Liu X H, Zhang T, et al. On-site measurement of winter indoor environment and air infiltration in an airport terminal[J]. Indoor Built Environment, 2019, 28 (4): 564-578.

[2] Liu X H, Lin L, Liu X H, et al. Evaluation of air infiltration in a hub airport terminal: On-site measurement and numerical simulation[J]. Building and Environment, 2018, 143: 163-177.

[3] Mei S J, Hu J T, Liu D, et al. Thermal buoyancy driven flows inside the industrial buildings primarily ventilated by the mechanical fans: local facilitation and infiltration[J]. Energy and Buildings, 2018, 175: 87-101.

[4] Goubran S, Qi D H, Saleh W F, et al. Comparing methods of modeling air infiltration through building entrances and their impact on building energy simulations[J]. Energy and Buildings, 2017, 138: 579-590.

［5］Sandberg M, Mattsson M, Wigo H, et al. Viewpoints on wind and air infiltration phenomena at buildings illustrated by field and model studies[J]. Building and Environment, 2015, 92: 504-517.

［6］胡萨娜, 苏晓明 . 呼和浩特市绿色公共节能建筑入口空间模式研究[J]. 安徽建筑, 2017, 24 (2): 175-177.
Hu S N, Su X M. Study on the entrance space model of green public energy-saving buildings in Hohhot[J]. Anhui Architecture, 2017, 24(2): 175-177. (in Chinese)

［7］Qi S D, Zhou C Y. Energy-saving design research of entrance space for commercial building in cold region[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3308(587/588/589): 393-396.

［8］Frank D, Linden P F. The effects of an opposing buoyancy force on the performance of an air curtain in the doorway of a building[J]. Energy and Buildings, 2015, 96: 20-29.

［9］Qi D H, Goubran S, Wang L Z, et al. Parametric study of air curtain door aerodynamics performance based on experiments and numerical simulations[J]. Building and Environment, 2018, 129: 65-73.

［10］Shu C, Wang L Z, Zhang C, et al. Air curtain effectiveness rating based on aerodynamics[J]. Building and Environment, 2020, 169: 106582.

［11］宗序平 . 数理统计学及其应用: 使用MATLAB[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
Zong X P. Mathematical statistics with applications in MATLAB[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.(in Chinese)

［12］魏莱 . 寒冷地区商业综合体被动设计的节能潜力[D]. 天津: 天津大学, 2019.
Wei L. Energy-saving potential of passive design for commercial complexes in cold region of China[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)

［13］Blocken B. Computational fluid dynamics for urban physics: importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations[J]. Building and Environment, 2015, 91: 219-245.

［14］Fiveland W A. Three-dimensional radiative heat transfer solutions by the discrete ordinates method[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1988, 2 (4): 309-316.

［15］Marvin J G. Book review turbulence modeling for CFD[J]. AIAA Journal, 1994, 32(6): 1339.

［16］Bois P A. Asymptotic aspects of the boussinesq approximation for gases and liquids[J]. Geophysical Fluid Dynamics, 2012, 58 (1/4):45-55.

［17］Chen, Q. Comparison of different k- ε models for indoor air flow computations[J]. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 1995, 28 (3):353-369.

［18］Hedin A E, Fleming E L, Manson A H, et al. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1996, 58(13): 1421-1447.

［19］陶文铨 . 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
Tao W Q. Numerical Heat Transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.(in Chinese)

［20］朱自强 . 应用计算流体力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
Zhu Z Q. Applied computational fluid dynamics [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 1998. (in Chinese)

［21］丁祖荣 . 工程流体力学[M].北京:机械工业出版社, 2013.
Ding Z R. Engineering fluid mechanics[M]. Beijing: China machine press, 2013. (in Chinese)

［22］Brown T R , Judd D R . Wide range gas flow system with real time flow measurement and correction: U.S. Patent 6,216,726 [P]. 2001.

［23］杨有涛, 徐英华, 王子钢 . 气体流量计[M]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
Yang Y T, Xu Y H, Wang Z G. Gas meters[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2007.(in Chinese)

［24］Lawson T V, Penwarden A D. The effects of wind on people in the vicinity of buildings [C]. Proceedings of the 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Heathrow: Cambridge University Press, 1975: 605-622.

（编辑　陈移峰）