

基于曲面的贴附送风模式适用性研究 ——以最速降线曲面为例

李安桂, 杨 静, 王英志

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 曲面型建筑在我国及世界上源远流长, 这些曲面造型融合了建筑师的灵感与其环境、功能、结构等因素。曲面形状以多种形体构成, 本文以最速降线曲面为例, 探究基于曲面贴附送风模式气流组织形式的适用性。通过 CFD 数值模拟和理论分析相结合的方式, 研究了最速降线曲面贴附送风形式在不同曲率、送风速度和温度下室内的速度场和温度场分布。研究表明, 贴附送风可以适用于最速降线曲面, 且是一种通风效率较高、工作区人员热舒适性较好的气流组织形式, 可以推广到圆形、椭圆形和抛物线形等多种形状。

关键词: 贴附送风 气流组织 最速降线曲面 流场 数值模拟

中图分类号: TU834.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)04-0575-07

Research on attached air ventilation based on brachistochrone curved wall

LI Angui, YANG Jing, WANG Yingzhi

(School of Environmental Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The curved building in our country and the world has a long history, and these curved surfaces blend the architect's inspiration with its environment, function, and structure, and other factors. The shape of the curved surface is made up of various shapes in this paper, and the brachistochrone curved wall was used as an example to explore the applicability of the air distribution of attached air curtain ventilation. By combining CFD numerical simulation and theoretical analysis method, the velocity field and temperature field distribution in the room with different surface curvature, air supply velocity and temperature were studied. Results show that the attached air curtain ventilation mode can be applied to brachistochrone curved wall, and it can create a comfortable environment in the occupied zone with high ventilation efficiency. Therefore, the attached air curtain ventilation mode can be applied to the space of the building with circular, elliptical, parabola and other building planar shape.

Key words: attached ventilation; air distribution; brachistochrone curved wall; flow field; numerical simulation

从古代传统建筑到现代建筑, 曲面型建筑在我国及世界各国源远流长。这些曲面造型既体现了建筑师的艺术与灵感, 也与环境、功能、结构等理性因素紧密相关。一般而言, 曲线形状往往由不同的形体(棱、柱、锥、球、壳、拱)构成。例如, 双曲面建筑是马鞍形的, 由两组曲率相反的拉索交叉组成, 其曲面为双曲抛物面, 外形多变, 可适用于圆形、椭圆形、菱形等多种建筑平面形状, 曲面建筑室内环境形态国内国外有很多应用, 如北京天坛, 闽南民居建筑承启楼^[1], 上海的东方明珠电视塔, 美国苹果飞船总部等。气流

组织技术是营造室内环境的通风空调系统的最终体现和最直接的终端技术。现在的主要气流组织形式有混合通风、置换通风和个性化送风, 国内外主要是针对以上三种送风方式存在的问题进行研究, 提出了一系列新型送风模式。本课题组十几年来提出了竖壁贴附射流气流组织通风模式, 并持续不断的进行了多年的理论、设计与工程实践^[2-11]。竖壁贴附射流气流组织实现了“上置换通风”, 融合了“混合式”上部送风和“置换式”两种方式优势, 显著提高了通风效率。但是现有贴附类送风模式的贴附对象都是竖直壁面或水平天花板,

收稿日期: 2017-05-22

修改稿日期: 2018-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50778145); 国家重点研发计划项目(2016YFC0700500); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JQ7235)

第一作者: 李安桂(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事通风空调气流组织、地下空间环境工程保障技术等研究领域。

E-mail: liag@xaua.edu.cn

而对具有曲面墙面的室内空间缺少相应的研究. 因此, 本文以最速降线^[12-14](又称摆线或旋轮线)曲面为例, 探究贴附送风模式气流组织形式的适用性.

本研究旨在探讨利用建筑曲面实现贴附送风气流组织的设计方法. 以最速降线(又称摆线或旋轮线)曲面为例, 研究贴附送风模式的适用性. 在建筑通风系统设计中, 采用 CFD 方法有助于预测室内空气气流组织^[15], 主要采用 CFD 数值模拟的

方法. 由于曲面建筑一般采用对称的方式, 现只讨论送风射流主体在竖向贴附的壁面为曲面, 采用 $L \times W \times H = 5.4 \text{ m} \times 7.0 \text{ m} \times 2.6 \text{ m}$ 的房间作为简化的计算域, 如图 1(b)所示, 宽度 $b = 0.05 \text{ m}$, 长度 $l = 2.0 \text{ m}$ 的条缝型散流器用来控制射流进入房间, 如图 1 所示. 研究曲面贴附送风模式下曲率、送风速度和温度等对该送风模式速度场和温度场的影响.

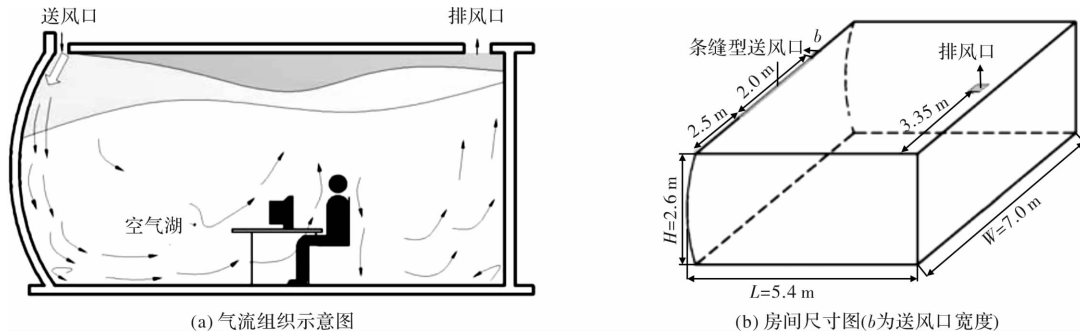


图 1 曲面贴附送风原理示意图

Fig. 1 Theory of curved wall attached air ventilation

1 数值计算模型建立和参数设定

1.1 计算模型的选择和建立

基于常见的工程应用背景, 选择曲率近似为 $0.236 \sim 0.436 \text{ m}^{-1}$ (是最小直径的客家土楼曲率的两

倍^[1])的最速降线曲面. 数值模拟计算区域如图 1 所示, 除了曲线部分采用非结构化网格, 其余均采用结构化网格以加快计算速度, 提高计算精度, 模型建立的具体参数如表 1 所示. 为提高计算精度, 对送、排风口区域、竖向贴附区和水平空气湖区网格进行了局部加密.

表 1 几种曲面的计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of several surfaces

曲面形式	滚圆半径/mm	使用弧长/mm	入口切角度/ $^{\circ}$	曲率 ρ/m^{-1}	网格数	网格类型
曲面 1	1 090	2 650	72	0.236	1 616 530	结构+非结构
曲面 2	755	2 692	63	0.336	1 613 130	结构+非结构
曲面 3	600	2 763	52	0.436	1 608 370	结构+非结构

网格质量对 CFD 计算精度和计算效率有重要影响. 为了验证计算网格的无关性, 对最速降线曲面 1 原有网格进行了改进, 生成了网格数为的 1 897 405 的自适应网格. 图 2 为原有网格和自适应网格采用剪应力输运 $\kappa\omega$ (SST $\kappa\omega$)模型在送风速度 2.0 m/s 的工况下, 竖向曲面贴附区和空气湖区轴线速度分布对比. 比较结果可知自适应网格计算结果与原有网格轴线速度分布规律一致, 竖壁贴附区两者轴线速度平均差值为 3.1% , 最大差值为 5.4% ; 空气湖区平均差值为 3.1% , 最大差值为 5.3% . 比较结果显示了采用原有计算网格(1 613 130 网格数)进行数值计算的有效性.

1.2 湍流模型的选择

不同的湍流模型可用于室内空气运动的预测, 采用贴附研究应用较多的是 Realizable $\kappa\epsilon$ 模型, 重整化群(RNG $\kappa\epsilon$)模型, 剪应力输运 $\kappa\omega$ (SST $\kappa\omega$)和基于线性压力应变的雷诺应力(RSM-IP), 结合文献[4, 17-18]的实验及模拟收敛情况, 本文选用 SST $\kappa\omega$ 模型研究曲面贴附送风模式. 用这 4 个湍流模型分别对曲面贴附式送风模式进行了等温工况预测, 表 2 给出了 4 种模型下竖向和水平向轴线速度的大小, 可以看出其余 3 个湍流模型竖向向轴线速度与 SST 湍流模型所得数据的平均偏差分别为 2.3% , 3.37% , 3.37% . 水平向空气湖方

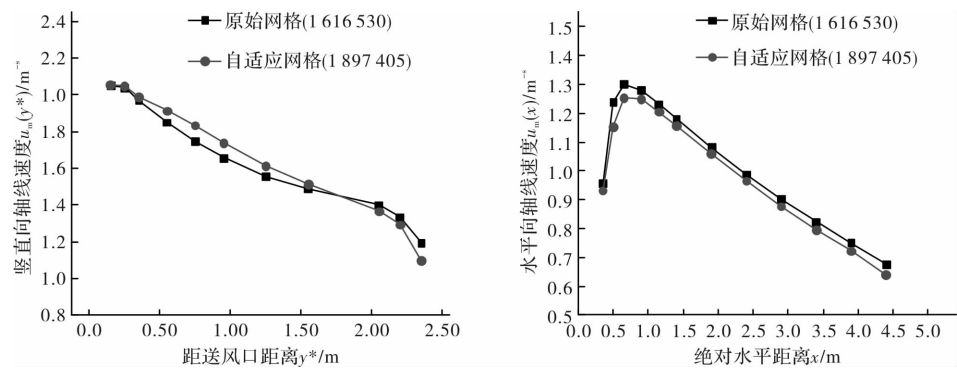


图 2 不同网格轴线速度分布比较

Fig. 2 Comparison of different mesh axis velocity

面, SST 湍流模型的预测结果与剩余 3 个湍流模型的差值相对竖向贴附区大, 分别为 12.82%, 16.01%, 17.47%, 这与文献[4]研究的竖壁贴附射流送风模式的实验结果与模拟预测的结果的差值趋势相似. 在非等温的工况下, SST $\kappa\omega$ 湍流模型在预测拐角处的冲击速度要表现的更好^[19].

表 2 4 种湍流模型的竖向和水平向轴线速度对比

Tab. 2 Vertical and horizontal axis velocity comparison of four turbulence models

速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	竖向贴附区/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$				水平向空气湖区/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			
	Realizable $k\text{-}\epsilon$	RNG $k\text{-}\epsilon$	RSM-IP	SST $k\text{-}\epsilon$	Realizable $k\text{-}\epsilon$	RNG $k\text{-}\epsilon$	RSM-IP	SST $k\text{-}\epsilon$
1.0	0.715	0.720	0.745	0.738	0.343	0.366	0.379	0.420
1.5	1.109	1.113	1.134	1.132	0.596	0.570	0.564	0.657
2.0	1.493	1.459	1.516	1.517	0.816	0.713	0.752	0.881

1.3 边界条件和初始条件设置

本文研究最速降线曲面贴附式送风模式在不同曲率下送风速度和温度的变化对流场和温度场的影响, 预测该送风模式气流组织的边界条件和初始条件见表 3.

表 3 数值模拟边界条件和初始条件参数设置

Tab. 3 Numerical simulation boundary and initial conditions parameter settings

项目	参数设置
送风速度 u_0	$u_0 = 1.0, 1.5, 2.0 \text{ m/s}$, 相切入 口进入室内
进口湍流强度 I	$I_{1.0} = 5.10\%$, $I_{1.5} = 4.12\%$, $I_{2.0}$ $= 4.55\%$
送风口水力直径 D_H	$D_H = b = 0.05 \text{ m}$
热源边界条件	$q = 50 \text{ W/m}^2$
初始条件	房间初始环境温度 $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, 送 风温度 $t_0 = 17, 19, 21 \text{ }^\circ\text{C}$
壁面边界条件	静止壁面 (Stationary wall), 无滑 移 (No-slip), $U = V = 0$

2 数值模拟结果分析

不同工况下最速降线曲面贴附射流气流组织特性主要与房间内气流流型及射流主体轴线速度

有关. 首先给出曲面贴附射流送风模式等温工况下全局流场和轴线速度分布情况; 其次讨论每种曲面的非等温送风模式下全局温度场、工作区水平轴线温度分布情况.

2.1 速度场分析

2.1.1 速度分布

曲率为 0.236~0.436 m 范围内的不同最速降线曲面在不同送风速度下都能在工作区形成类似于置换通风的“空气湖”状速度分布 (如图 3 所示). 对于同一曲率曲面, 不同送风速度下, 竖向曲面贴附区流场分布相似, 射流主体周围环境空气流速低于 0.1 m/s, 送风能够将新鲜空气和冷/热量有效的送到空气湖区; 水平方向, 射流主体速度衰减主要发生在地面 0.4 m 高度内, 随着曲率的增加, 速度衰减程度和离地面距离都会增加, 但程度不大, 其余区域速度分布均匀, 形成空气湖式速度分布. 随着送风速度的增加, 射流主体沿地面向前延伸扩散的能力增强, 但空气湖内速度最高不超过 0.3 m/s, 不会对人员造成吹风感^[19]. 送风射流都会在房间右下侧角落和房间右侧中部形成量级较小的漩涡, 曲率和速度的增大, 漩涡都会相应增大, 漩涡内空气流速均低于 0.1 m/s, 对整体速度分布的影响可以忽略.

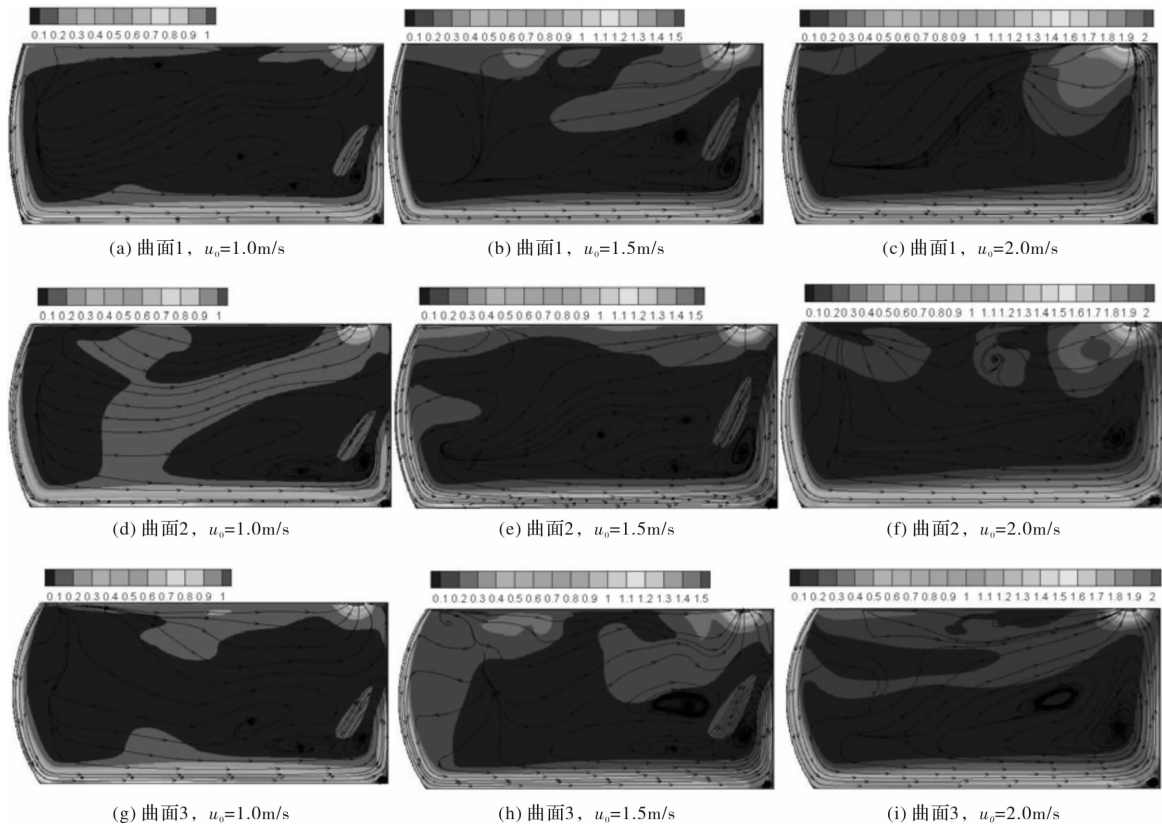


图3 不同工况下曲面空间流场对比

Fig. 3 Comparison of curved wall space flow field under different conditions

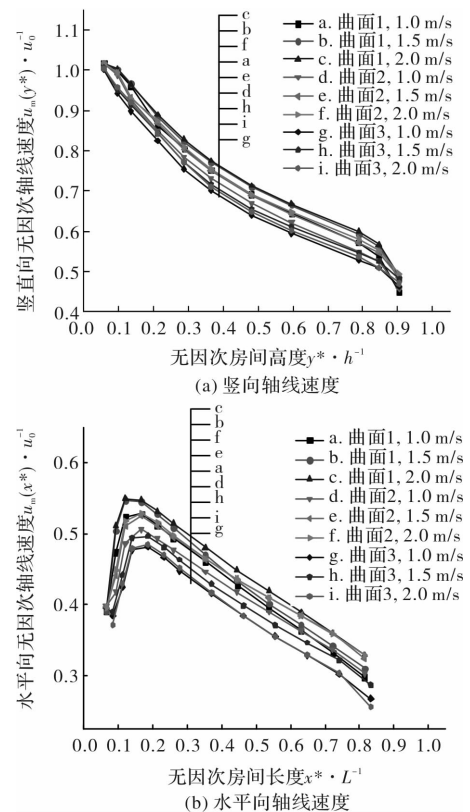
2.1.2 轴线速度分布

图4给出了三种曲率在不同速度下竖向曲面和水平向区域轴线速度的对比情况,为使距离从送风口开始计算,引入了一个相对距离参数 y^* ,定义为: $y^* = h - y$,其中 h 为房间高度, m ; y 为测点距地面距离, m 。可得,竖向曲面贴附区,同一曲率的曲面墙壁,不同送风速度下,竖向轴线速度分布规律一致;水平向空气湖区不同送风速度对应的无因次轴线速度分布也基本一致,射流在转向后存在一定的加速的变化趋势,转折点约在 $x/L = 0.48$ 处。曲率变大时,加速段相对靠后,这主要是因为曲率增大,偏转段位置靠后,范围也越大。而且曲率越大,水平距离越靠后速度衰减越快。

2.2 温度场分析

2.2.1 温度分布

图5为同一曲率曲面在室内负荷一定下最速降线曲面空间温度场,可知送风速度相同,不同送风温度下,室内温度分布呈现近似的分布规律。竖向向贴附区射流由送风口送出后,与室内环境空气发生一定量的掺混,射流轴线温度沿运动方向不断增高,方向转为水平向后,沿射流扩散延伸方向,轴线温度仍呈一定的增长趋势。沿房间高度方向,室内温度呈现明显的分层,工作区范

图4 同工况设置下无因次轴线速度对比($y^* = h - y$)Fig. 4 Comparison of dimensionless axis velocity under the same condition: ($y^* = h - y$)

围内,温度分布均匀,区域内头脚温差最大不超过 3°C ,工作区空气湖内人员舒适性较好。送风温度越低,垂直向及水平向对应取值点轴线温度值

越小,同时沿房间高度方向对应取点空气温度越小,但不同送风温度下,沿射流运动方向对应取值点温度与送风温度的差值大小近似一致。

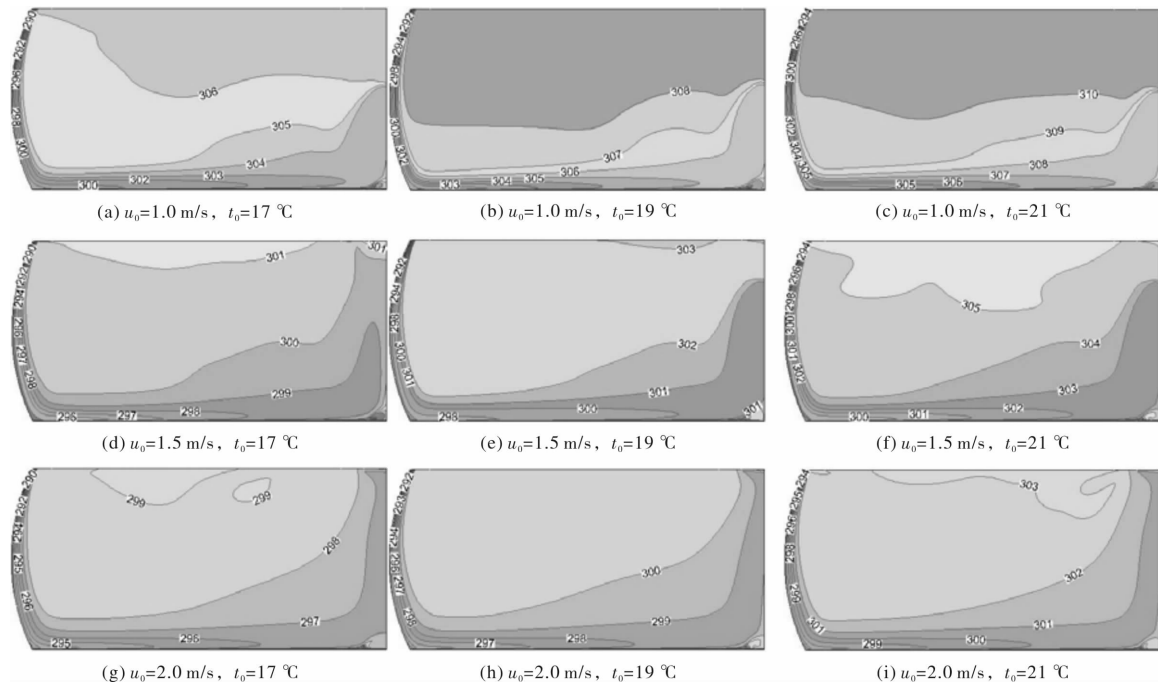


图5 曲面2不同工况下最速降线曲面空间温度场对比

Fig. 5 Comparison of brachistochrone curved wall space temperature field under different conditions of surface 2

同一送风温度,不同送风速度下,曲面空间温度分布仍呈现近似的分布规律。送风速度越高,垂直向贴附区射流主体轴线温度衰减越慢,这将有助于能够将冷量有效的下送到工作区;沿工作区长度及高度方向,空气温度梯度减小,均匀性增强,空气湖均匀性进一步提高,当送风速度为 2 m/s ,温度 $t_0 \leq 19^{\circ}\text{C}$ 时,射流主体轴线温度及工作区内脚踝处空气温度数值较低,易造成室内人员的吹风感,其他工况都满足人体热舒适要求。因此工程设计中在满足设计要求的前提下,可以考虑采用较高的送风速度和送风温度,以提高送风效率和工作区人员的舒适性。

2.2.2 轴线温度分布

图6给出了曲面2在室内负荷一定情况下的水平向贴附区剩余温度对比,不同送风速度及温度工况下射流主体剩余温度随流动距离的增加呈现近似一致的指数衰减规律,变化趋势与尹海国^[4]给出的竖壁贴附射流水平向空气湖的相同。由于曲面贴附射流主流所走路线比竖壁贴附射流要长,空气湖主流区对应点的射流轴线剩余温度比竖壁贴附射流的大。

2.3 关于最速降线曲面的推广讨论

根据以上对最速降线曲面空间贴附射流送风

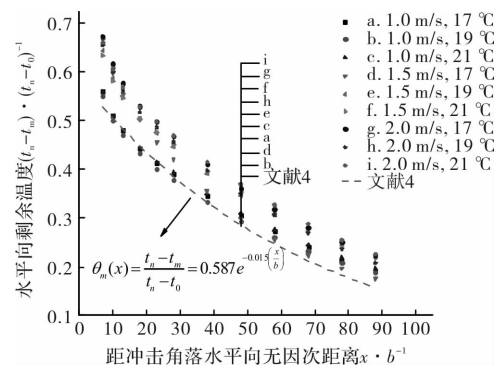


图6 曲面2不同工况设置下水水平向贴附区剩余温度对比

Fig. 6 Comparison of residual temperature in horizontal attachment area under different conditions of surface 2

模式的分析及最速降线的特点,本章所取最速降线所取曲率相比同等大小的圆形近似为 $0.236 \sim 0.436\text{ m}$ 的范围内,并且该曲率范围内工作区的温度和速度在不同工况下分布近似一致,这说明在该曲率范围内的曲线的曲面空间贴附射流送风模式也同样适用,图7为曲率近似都为 0.336 m 的情况下圆弧、最速降线和椭圆曲线在同种高度下的长度和形状比较,其中圆弧所用弧长与最速降线相差 0.028 m ,椭圆曲线所用弧长与最速降线相差

0.029 m, 可以忽略相差的曲线长度. 因此在曲率相差不大的情况下, 最速降线曲面空间贴附射流送风模式可以推广应用于其他曲面形状, 如椭圆弧、圆弧及抛物线等形状的建筑空间内的通风空调气流组织工程.

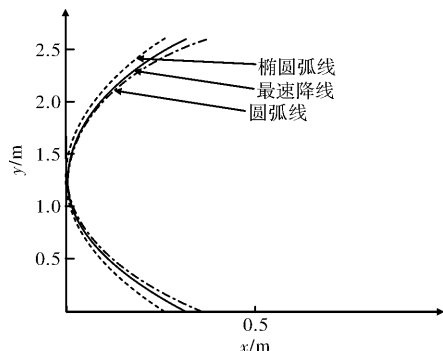


图7 几种曲线在相同高度($y=2.6\text{ m}$)下的横截面形状

Fig. 7 Cross-section shapes of several curves at the same height ($y=2.6\text{ m}$)

3 结论

基于最速降线曲面, 研究了最速降线曲面贴附送风形式在不同曲率、送风速度和温度下室内的速度场和温度场分布. 贴附送风可以适用于一些曲面墙体, 一种通风效率较高的气流组织形式.

(1) 对于最速降线曲面空间内的贴附送风模式, 在竖向曲面贴附区, 轴线速度呈现出近似分布规律, 曲率越大, 速度衰减的越快; 而在水平向空气湖区方面, 不同曲率下, 平均轴线速度也呈现出近似的分布规律, 射流在转向后存在一定的加速. 各工况下, 送风均能在工作区形成空气湖速度分布, 湖内最高速度不超过 0.3 m/s . 曲率变大时, 加速段相对靠后, 这主要是因为曲率增大, 偏转段位置靠后, 而且范围较大的缘故.

(2) 在通风空调设计规范参数范围内, 曲率不变, 对于一般高 3 m 左右的办公建筑曲面空间高度方向, 室内温度呈现明显的分层现象, 工作区范围内温度分布均匀, 头脚温差最大不超过 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最速降线曲面贴附送风模式能够在工作区形成空气湖状温度分布模式, 满足人员热舒适性要求, 当送风速度为 2 m/s 时, 送风温度不宜低于 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$.

(3) 贴附射流送风能在具有最速降线曲面空间内的工作区内形成类似于置换通风的“空气湖”状速度及温度分布, 因此, 贴附送风模式可适用于最速降线曲面空间内, 能有效改善室内通风空调气流组织, 并有助于推广应用于圆形、椭圆形和抛物线形等其他曲面形状的建筑空间内的通风空

调气流组织工程中.

参考文献 References

- [1] 徐懿睿, 钟兆荣. 中国圆形建筑设计中的文化内涵[J]. 电影评介, 2009(4): 83-84.
XU Yirui, ZHONG Zhaorong. Cultural connotation in Chinese circular architecture design[J]. Movie Review, 2009(4): 83-84.
- [2] 李安桂, 邱少辉. 竖壁贴附射流空气湖模式通风系统, 200810017349.0[P]. 2008-01-21.
LI Angui, QIU Shaohui. Vertical wall attached to jet air lake mode ventilation system, 200810017349.0[P]. 2008-01-21.
- [3] 李安桂, 陶鹏飞, 赵玉娇, 等. 一种方柱面贴附射流的送风方法, 201010549211.2[P]. 2012-10-10.
LI Angui, TAO Pengfei, ZHAO Yujiao, et al. An air supply method with square cylinder attached jet, 201010549211.2[P]. 2012-10-10.
- [4] 尹海国. 条缝型送风口竖壁贴附射流气流组织设计研究方法[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
YIN Haiguo. Study on Design Procedures of Air Distribution by Air Curtain Ventilation with A Linear Slot Diffuser[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2012.
- [5] 张如春. 竖壁贴附射流空气池现象数值模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
ZHANG Ruchun. Numerical Simulation of Downward Directed Vertical Wall Jets and Air Lake Phenomena[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2006.
- [6] 刘艳鹏. 竖壁贴附射流及其空气池现象的数值模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
LIU Yanpeng. Numerical simulation and approach of Downward Directed Vertical Wall Jets and Air Lake Phenomena[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2007.
- [7] 邱少辉. 一种新型通风方式一条缝型送风口形成的竖壁贴附射流通风模式的2DPIV实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
QIU Shaohui. A new type of ventilation-2DPIV study of Downward Directed Vertical Wall Jets formed by slot inlet[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [8] 王国栋. 一种新型通风方式: 非等温条件下条缝型送风口形成的竖壁贴附射流通风模式的2DPIV实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
WANG Guodong. A new type of ventilation-2DPIV studies of air curtain ventilation in a slot-ventilated enclosure: Non-isothermal condition[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2009.

- [9] 王瑞乐. 非等温竖壁贴附送风气流组织的速度及温度场研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
WANG Ruile. Study of velocity and temperature field of non-isothermal attached air curtain ventilation mode [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2015.
- [10] YIN H, LI A, LIU Z, et al. Experimental study on airflow characteristics of a square column attached ventilation mode. [J]. Building & Environment, 2016, 109:112-120.
- [11] LI A G, YIN H G, WANG G D. Experimental Investigation of Air Distribution in the Occupied Zones of an Air Curtain Ventilated Enclosure [J]. International Journal of Ventilation, 2016, 11(2):171-182.
- [12] 贾小勇. 19 世纪以前的变分法[D]. 西安:西北大学, 2008.
JIA Xiaoyong. The Calculus of Variations before the 19th Century[D]. Xi'an: Northwest University, 2008.
- [13] 尤明庆. 最速降线求解和摩擦力影响的研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2005, 24(1):83-88.
YOU Mingqing. Research on the solution of the steepest descending line and the influence of friction [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science Edition), 2005, 24(1):83-88.
- [14] 王海军. 巧解最速降线及其等时性[J]. 大学物理, 2015, 34(8):16-18.
WANG Haijun. Cleverly solve the steepest descending line and its isochronism [J]. COLLEGE PHYSICS, 2015, 34(8):16-18.
- [15] CHEN Q. Computer simulations and experimental measurement of air distribution in buildings: Past, Present and Future[J]. Hvac & R Research 2011; 13 (6): 849-851.
- [16] CAO G, RUPONEN M, PAAVILAINEN R, et al. Modelling and simulation of the near-wall velocity of a turbulent ceiling attached plane jet after its impingement with the corner [J]. Building and Environment, 2011, 46(2): 489-500.
- [17] CHEN Q. Comparison of different k- ϵ models for indoor air flow computations [J]. Numerical Heat Transfer, Part B, 1995, 28(3): 353-369.
- [18] RUPONEN M, TINKER J A. CFD validation of the thermal comfort in a room using draft rates[J]. Osiris, 2007; 16(1): 321-342.
- [19] ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy; ANSI/ASHRAE 55-2004 [S]. Atlanta, USA: ASHRAE, Inc., 2004.

(编辑 桂智刚)

(上接第 574 页)

- [12] 史阳光,冯勇. 棉花秸秆草砖墙热工性能研究[J]. 新型建筑材料, 2016(1):43-45.
SHI Yangguang, FENG Yong. Study on thermal performance of cotton straw brick [J]. New Building Materials, 2016(1):43-45.
- [13] 晋强,冯勇,陈亮亮. 棉花秸秆草砖力学性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2014(4):51-54.
JIN Qiang, FENG Yong, CHEN Liangliang. Experimental study on mechanical properties of cotton straw bale [J]. New Building Materials, 2014(4):51-54.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 农村居住建筑节能设计标准:GB/T50824-2013 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Design standard for energy efficiency of rural residential buildings: GB/T50824-2013 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [15] 闫增峰. 生土建筑室内热湿环境研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2003.
YAN Zengfeng. Dynamic modelling of the indoor thermal and humidity environment in the adobe buildings [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2003.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑室内热湿环境评价标准:GB/T50785-2012 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Evaluation standard for indoor thermal environment in civil buildings: GB/T50785-2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室内空气质量标准:GB/T 18883-2002 [S]. 北京:中国标准出版社, 2002.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Indoor Air Quality Standard: GB/T 18883-2002 [S]. Beijing: China Standard Press, 2002.

(编辑 桂智刚)