

基于人体热舒适的室内顶板送风 个人制冷系统的入风参数研究

胡嘉文, 赵诗庆, 邹金成

生物医学工程学院, 上海交通大学, 上海市





目录

研究背景

Introduction and backgrounds

模型建立与设置

CFD model developments

结果与讨论

Results and discussions

结论与展望

Conclusions and future work



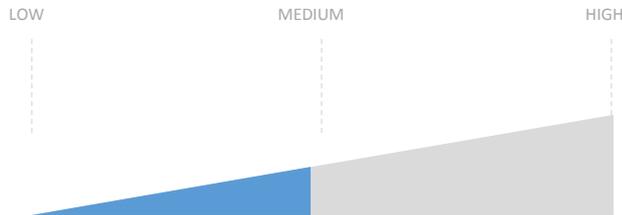
PART 01

研究背景

Introduction and backgrounds

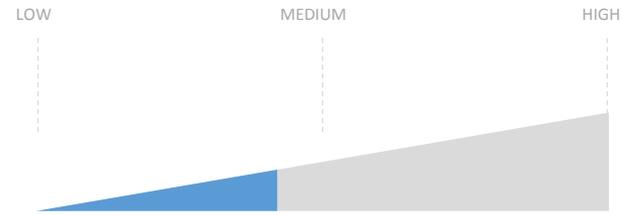


研究背景



▶ 40-50%

HVAC系统耗电量占
总耗电量比例



▶ 39%

人们对工作热环境
的满意程度

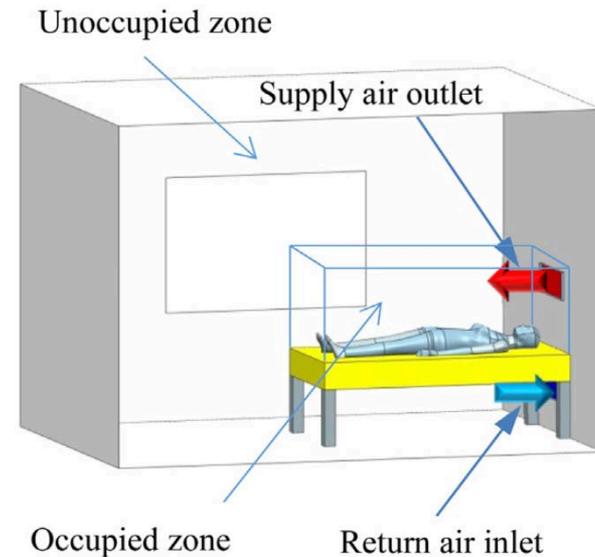
节能、舒适

[1] F. Zhang et al., Building and Environment, 2017.

[2] Da Li and V. R. K. Carol C. Menassa, Building and Environment, 2017.



Task-ambient AC system



直接向目标区域输送空气温度调节量，使得
系统能耗降低，人体舒适度提高

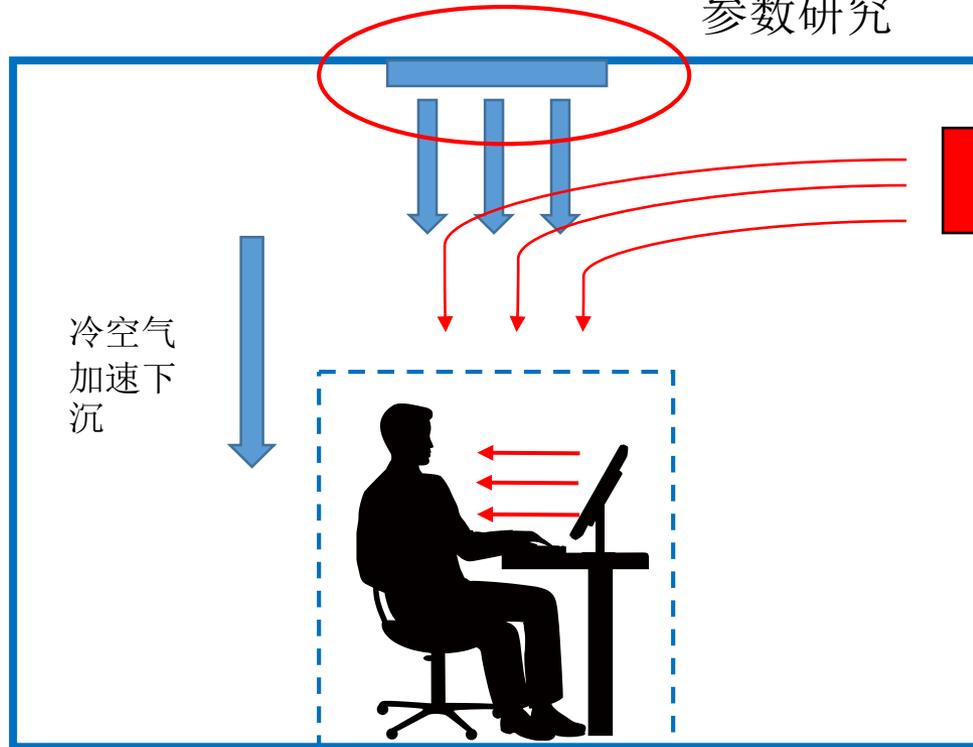
[3] D. Faulkner, W. J. Fisk, D. P. Sullivan, and D. P. Wyon, *Indoor Air*, 1999.

[4] N. Mao, M. Song, S. Deng, D. Pan, and S. Chen, *Energy and Buildings*, 2016.



设计思路

风口设计、
参数研究





PART 02

模型建立与设置

CFD model developments



几何模型

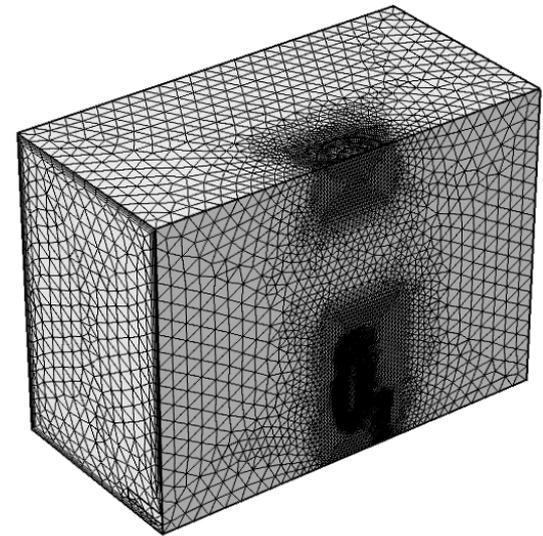
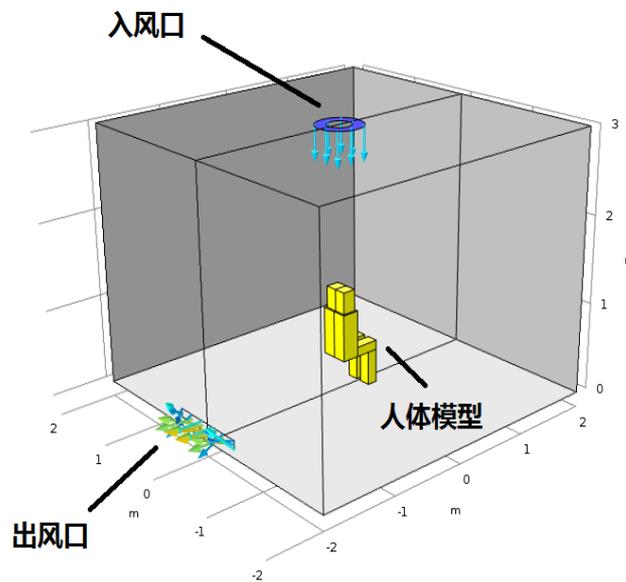


房间尺寸：
 $4\text{m} \times 4\text{m} \times 3\text{m}$

出风口尺寸：
 $1\text{m} \times 0.1\text{m}$

关于xz面对称

网格数：
约60万





热舒适描述——PMV



$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times \left[\begin{aligned} & \textcircled{M} - W \\ & \text{H: 净焓} \\ & -3.05 \times 10^{-3} \left\{ 5733 - 6.99(M - W) - \textcircled{P_a} \right\} - 0.42 \left\{ (M - W) - 58.15 \right\} \\ & \text{E}_d: \text{蒸发潜热} \qquad \text{E}_{sw}: \text{汗液蒸发} \\ & -1.7 \times 10^{-5} M (5867 - P_a) - 0.0014 M (34 - \textcircled{t_a}) \\ & \text{E}_{re}: \text{呼吸蒸发热} \qquad \text{L: 环境热负荷} \\ & -3.96 \times 10^{-8} \textcircled{f_c} \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \right] - f_{cl} \textcircled{h_c} (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \right]$$

R: 辐射热 **C: 对流换热**



参数设定



主要不变参量

参量	数值	描述
I_cl	0.6	衣着指数
M	70[W/m ²]	新陈代谢热
Phi_a	0.6	空气湿度
W	0[W/m ²]	劳动负荷
h_body	4[W/(m ² *K)]	体表对流换热系数
T_in	19℃	入风温度
r	0.15[m]	圆环内圆半径
S	0.2[m ²]	圆环风口入风面积

主要边界条件

边界	边界条件
壁面	绝热
人体边界	第三类边界条件, h=4[W/(m ² *K)]
入风口	19℃, 风速为V或Q/S
出风口	压力边界



控制方程



采用三维求解雷诺平均的N-S方程(RANS)结合连续方程和能量守恒方程计算

湍流模型: Standard $k - \varepsilon$ 模型

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

能量方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

动量方程:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nabla \cdot \left\{ -p \vec{I} + (\mu + \mu_t) [\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T] - \frac{2}{3} (\mu + \mu_t) (\nabla \cdot \vec{v}) \vec{I} - \frac{2}{3} \rho k \vec{I} \right\} + \vec{F} + (\rho - \rho_{ref}) \vec{g}$$



求解器设置及后处理

- 采用瞬态求解器求解，容差使用物理场控制的默认设置。

- 求解时间为30s(或更长)，存储结果的时间步长设置为：

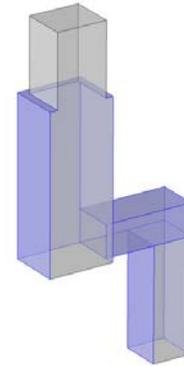
0-10s: 1s/step

10-30s(或更长): 5s/step

- 数据获取：

在定义中定义人体身体表面（除去头部）的温度、风速的结果平均值，以及壁面温度结果平均值作为PMV方程的输入量。

后处理时在“全局变量”中直接导出PMV、体表温度、体表风速值进行研究。





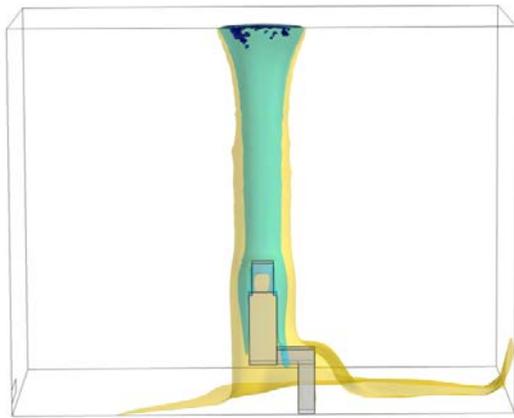
PART 03

结果与讨论

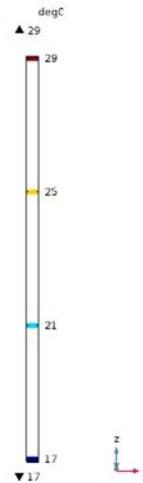
Results and discussions



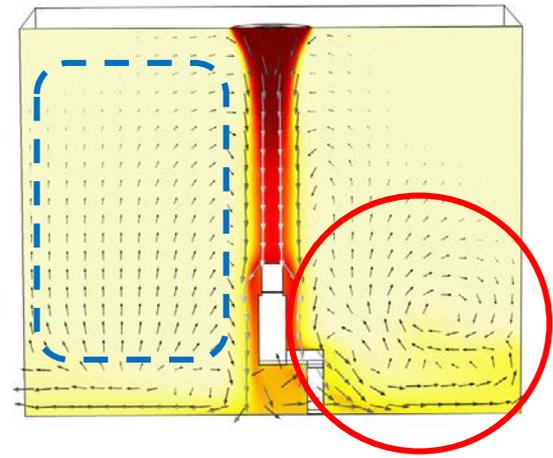
计算结果示意图



结果等温线示意图

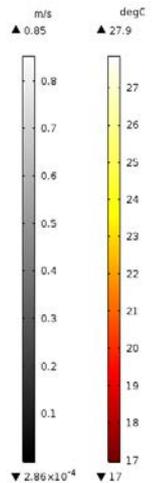


自然对流



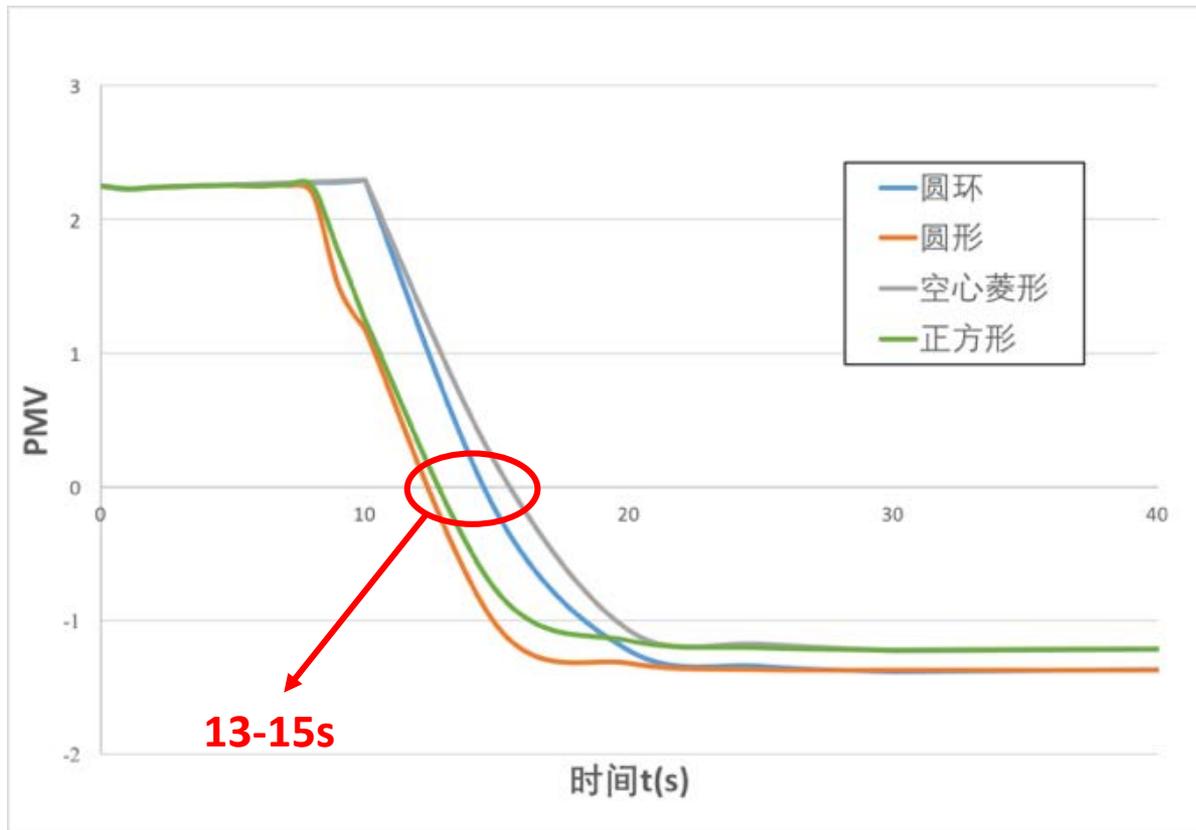
涡流

y=0.05m截面温度云图，速度矢量图





风口形状

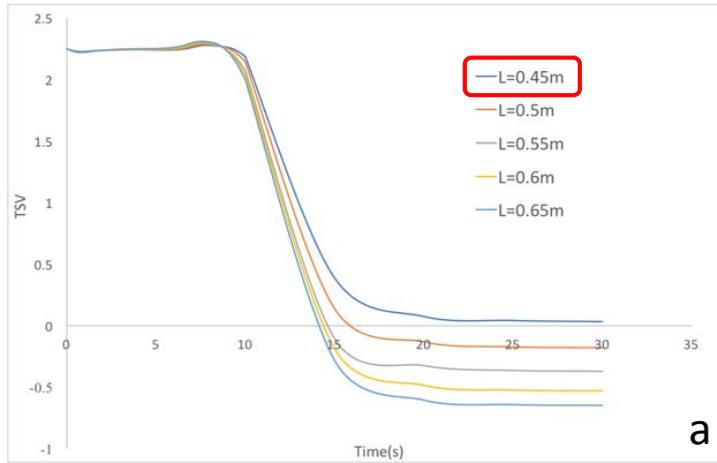


- 圆形风口制冷效果相对更好

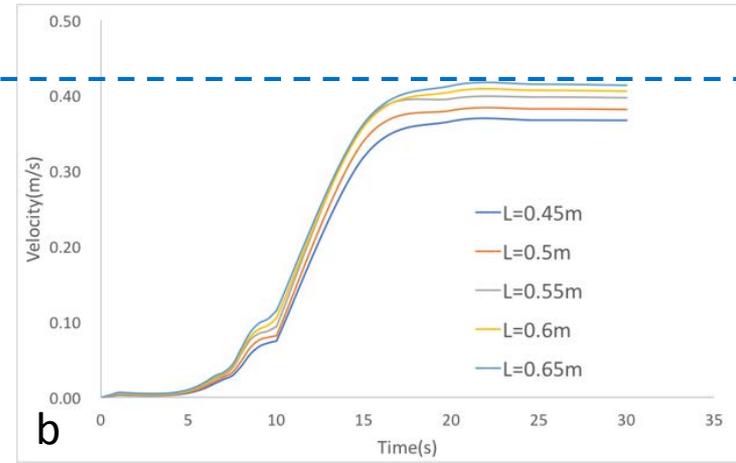
- 实心风口降温速度更快



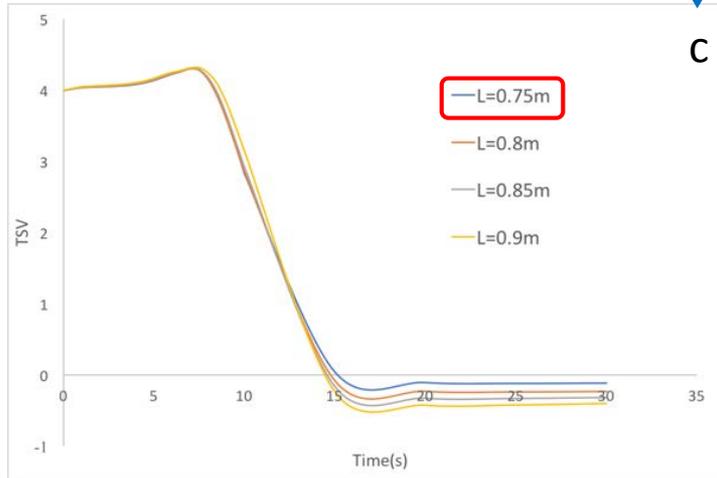
方形风口参数研究



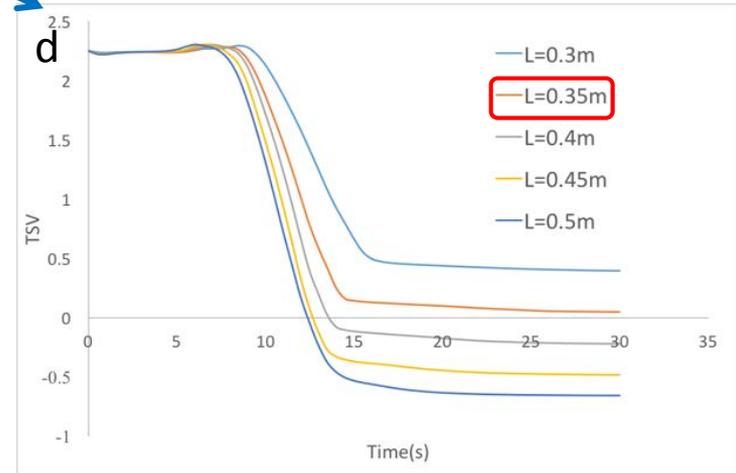
V=0.3m/s, $T_i=27^\circ\text{C}$, TSV



V=0.3m/s, $T_i=27^\circ\text{C}$, Velocity



V=0.3m/s, $T_i=30^\circ\text{C}$, TSV



V=0.5m/s, $T_i=27^\circ\text{C}$, TSV

a

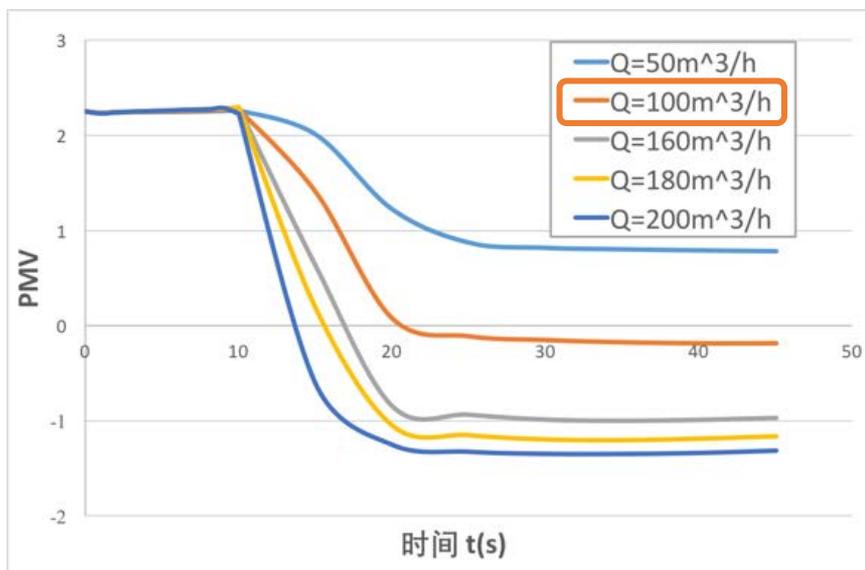
b

c

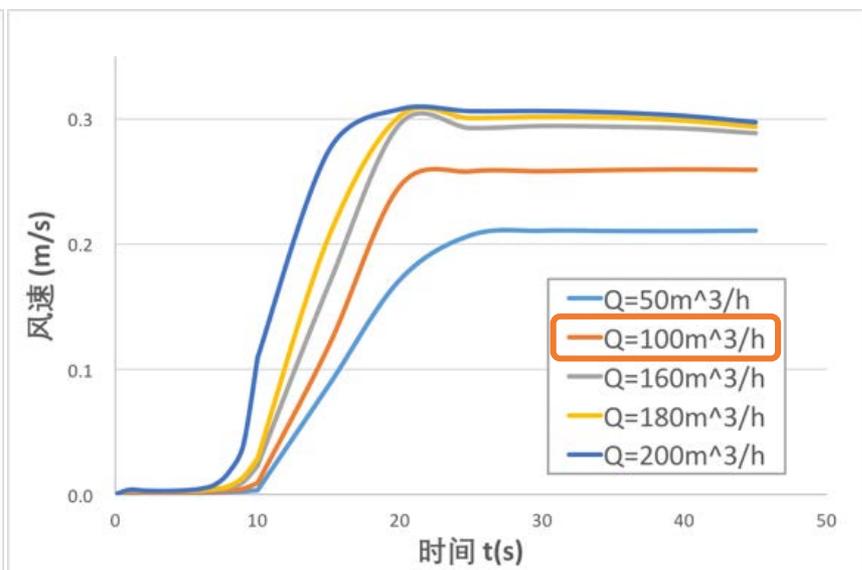
d



圆环风口送风流量研究



向下送风时PMV随流量变化



向下送风时体感风速随流量变化

入风口面积不变，制冷时稳定PMV值随入风流量增大而增大，且温和工况(Q=100m³/h)下最大风速不超过0.3m/s



PART 04

结论与展望

Conclusions and future work



研究结论



01 由顶板向下送风的系统可以通过合理的送风参数设计使用户**快速**达到**稳定的舒适环境**状态。



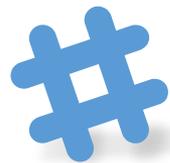
02 相对于方形风口而言，**圆形**风口在同样送风参数设置下可以获得**更好的制冷效果**。同时**实心**风口的**降温速度**相对更快。



03 在送风**速度一定**的条件下，制冷效果与**风口尺寸**成正相关。**减小风口速度**或设定**更高的初始室温**均会大幅降低制冷效果。



04 在所设定的圆环形风口条件下，只需**100m³/h**的送风流量即可满足大部分用户的热舒适需求。通过**增减送风流量**即可调节响应的目标区域热舒适程度。





改进与展望

受限于计算速度，模型选择了用壁函数描述边界的 **Standard $k - \epsilon$** 模型。若对模型进行合适的调整修正，条件允许的情况下可以选择更为精确的其他湍流模型，如 **SST, Realizable $k - \epsilon$** 等

对于 **PMV** 公式的完整应用，可以通过 **导出 CFD** 模拟计算数值，在 **外部** 软件或脚本中进行 **迭代计算** 来实现。

对 **送风温度** 的调节在现实中可能更易实现，可以通过参数扫掠研究其影响。

可以将向下送风的制冷系统设计与其他 **现有空气调节系统** 结合起来，通过 **CFD** 研究更为综合且实际的环境场。



谢谢！

