

基于 CFD 气流模拟优化洁净室厂房通风系统的研究

马开风

中国电子系统工程第三建设有限公司 四川 成都 610073

【摘要】：本文详细介绍洁净室气流模拟原理，以一典型半导体生产基地项目光刻区为例，提出该项目气流模拟实现的方案和步骤，对洁净室温度、速度、压降进行 CFD 气流模拟。根据模拟结果调整系统设计方案，为实现洁净室新风系统在空间及地板平面布局满足洁净室空间气流的稳定，确保各区域气流分布合理，具有很好的动态适应性，提供技术方案。

【关键词】：气流模拟；洁净厂房；通风

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.050

1 引言

随着工业技术的不断进步,现代工艺产品的生产和现代科学实验活动等对室内空气洁净度的要求越来越高。尤其是半导体厂、锂电池厂、生物医药等生产依托洁净空间,洁净空间气流组织形式是影响洁净室内洁净度、悬浮粒子颗粒数、温湿度均匀性、压差、空调能耗等重要因素^[1],可以减少洁净室内的污染物存留,尽快将污染物通过回风排出到室外。CFD 气流模拟是指利用计算机数值计算,模拟得到图像显示,以研究流体与传热等物理问题为目的的技术。其研究方法总体概括为:给定边界条件,求解代数方程组^[2]。CFD 技术的模拟预测主要有三个阶段:前处理阶段、求解阶段、后处理阶段^[3]。针对具体的工艺生产对象、厂房空间结构和洁净空调形式,基于 CFD 洁净室气流组织设计与评价,可获得可靠的工程信息^[4]。本文拟对一洁净生产区域进行模拟并对结果进行优化分析,优化洁净室内气流组织,为施工方案提供有力支撑。

2 气流模拟理论基础

模拟区域的洁净室使用的空气默认为标准大气压 $T=295K$, $RH=55\%$ 的空气,此状态下的空气密度 ρ 为 $1.205kg/m^3$, 运动粘度 ν 为 $1.83 \times 10^{-5}pa.s$,运动粘度 ν 为 $1.519 \times 10^{-5}m^2/s$ 。

根据现有模型的几何尺寸得出雷诺数:

$$Re = \frac{V * L}{\nu}$$

Re----空气的流动雷诺数。

V----空气的流速 (m/s)。

L----流动的几何长度 (m)。

ν -----空气的运动粘度 (m^2/s)。

经计算,从流动的雷诺数看,气流属于雷诺数较低的紊流流动,属于单向流。综上情况本次数值计算将使用 Fluent 软件对洁净室进行气流模拟。软件的结构由前处理、求解器及后处理三大模块组成, Fluent 软件的核心部分是纳维-斯托克斯方程组(包括了连续性方程,动量守恒方程)的求解模块。

守恒方程通用形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \Phi dV + \int_S \rho \Phi v_n dS = \int_S \Gamma \text{grad}(\Phi) n dS + S_\Phi$$

其中: S、V、n 分别表示控制体的表面积、体积、表面单位法向量。

根据不同的参数情况,上式方程可以表示不同的守恒方程,取值如表所示:

表 1 守恒方程

方程	Φ	Γ	S_Φ
连续性方程	1	0	0
x-动量方程	u	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x} + S_M$
y-动量方程	v	μ	$-\frac{\partial p}{\partial y} + S_M$
z-动量方程	w	μ	$-\frac{\partial p}{\partial z} + S_M$
能量方程	i	λ	$-\rho \text{div}(u) + \Phi + S_i$

Navier-Stokes 方程对湍流仍适用,了解紊流所引起的平均流场的变化。所以,人们很自然地想到求解

时间平均的控制方程，而将瞬态的脉动量通过某种模型在时均方程中体现出来，即 RANS（Reynolds Averaged Navier-Stokes）模拟方法，其方程的数学表达式为：

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[u \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j})$$

式中 $\frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j})$ 表示经过时均之后，方程中出现了雷诺应力等关联项。

仿真目的：运用洁净室气流模拟原理，提出本项目气流模拟实现的方案和步骤，针对本项目洁净室气流循环薄弱区域，并提出专业改善方案和建议；洁净室新风系统在风管空间及地板平面布局方面要满足洁净室空间气流的稳定，确保各区域气流分布合理，具有很好的动态适应性，提供风管深化设计布局 and 检测方案；洁净室周边 FFU 及盲板布置满足洁净室空间气流的稳定，确保洁净室区域气流分布合理，具有很好的动态适应性，提供技术方案；

3 总体模拟方案规划

3.1 模拟区域选择

本次模拟区域为二层核心洁净生产区，本区域空调设备、空间架构及生产设备较多，是比较典型的生产厂区。该区域高架地板高度 0.8m，采用 MAU 新风机组，FFU 及 DCC 共同控制内部温湿度及压力要求，送回风形式为垂直单向流。该区域由 MAU 及 FFU、DCC 共同控制洁净室内的温度、湿度、洁净度。：

3.2 三维几何建模

3.2.1 高架地板条件拟定

模拟区域高架地板尺寸规格为 600mm*600mm，蓝色为盲板，黄色为开孔率 17%高架地板，橙色为开孔率 25%高架地板，靛色为开孔率 50%高架地板，对角线公差控制在 0mm-5mm 以内，地板的完成高度为 2.5m，支撑脚直径：1500 型以下及地板，管径不小于 φ48 且满足承重需求；2000 型及以上地板，管径不小于 φ60 且满足承重需求，支撑脚、横梁材质：碳钢\铝合金上托，上托厚度不小于 5mm，上托 1/4 单点荷载不小于 3 吨并提供第三方测试报告心。

支撑脚螺杆尺寸：中 48 支撑螺杆不小于 M20，中 60 支撑螺杆不小于不小于 M24，且须满足承重需求；支撑件等表层处理：支撑脚、L 型收边角钢、角钢斜撑、横杆、支架下托表面均为环氧喷涂，钢上托为五彩镀锌处理/铝合金上托为抛丸处理。在建模过程中按上述处理建模。

3.2.2 FFU 条件拟定

该模拟区域采用 MAU 新风机组、FFU、DCC 等共同控制洁净室内的温湿度，该区域有且仅有一种型号的 FFU。

3.2.3 DCC 条件拟定

该区域 DCC 采用吊挂式排布模拟区域存在多种 DCC 规格三维建模参数设定均按照设备参数考虑。

3.3 网格划分

对模拟区域进行网格划分，采用六面体核心网格配合多面体边界网格的策略生成网格，生成后的网格数量约为 500 万，具体如图所示。

3.4 边界条件设定

上述计算模型采用的计算边界条件如表所示。

表 2 边界条件设置表

物理模型	边界条件
FFU	速度入口（velocityinlet）
隔墙	壁面边界（wall）
区域虚拟分割面	对称边界（symmetry）
下夹层隔断面及回风夹道	出流条件（outflow）

3.5 计算运行

迭代次数设置 5000 次，从而提高模拟精度，

4 结果分析

4.1 孔隙率对压力的影响

下图表示不同高架地板孔隙率下操作空间内压力分布。通过对比，容易发现高架地板的上部工作区域的压力随着孔隙率的增加而逐渐降低。当孔隙率为 17%时，工作区域的压力约为 140Pa 左右，而当孔隙率为 50%时，工作区域的压力约为 30Pa 左右。此外，随着孔隙率的增加，高架地板上部的工作空间的压力和下部回风通道的压力差逐渐缩小，这对于降低 FFU 运行能耗是有帮助的。所以，从降低 FFU 能耗的角度，建议增加孔隙率。

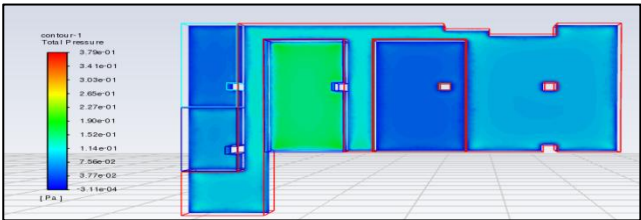


图 1 压力模拟图

4.2 孔隙率对速度分布的影响

不同高架地板孔隙率下操作空间内速度分布。容易发现,不同孔隙率下速度分布基本一致,高架地板上部工作空间内的流速较低,便于维持单向流动的状态。同时,在靠近侧边回风夹道和中部回风夹道的位置处流速较大,这部分空气在侧边和中间回风夹道内与新风混合,在这些位置维持较高的流速有利于回风与新风的混合。

4.3 孔隙率对流场的影响

下图表示高架地板孔隙率为 17%, 25%, 50% 时,操作空间内速度矢量分布。容易发现,此时 X 轴截面上,高架地板以上的工作空间的速度矢量表现出较好的单向流特性。此外,对比其他不同孔隙率时的速度矢量分布可知,由于中部存在回风夹道,整体流动单向性均较好。

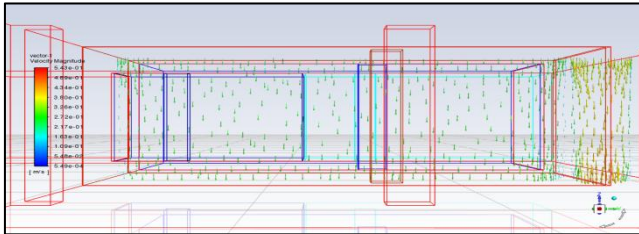


图2 气流速度矢量图

4.4 孔隙率对空气龄的影响

下图表示不同孔隙率下操作空间内空气龄分布。通过对比可知,空气龄随着孔隙率的增加而逐渐增加,

这不利于保持工作区域的空气洁净。究其原因,主要是因为孔隙率增加,增强了上部工作空间和回风夹道内空气的交流作用,增加了空气的停留时间。所以,从保持空气洁净的角度,本项目高架地板敷设合理。

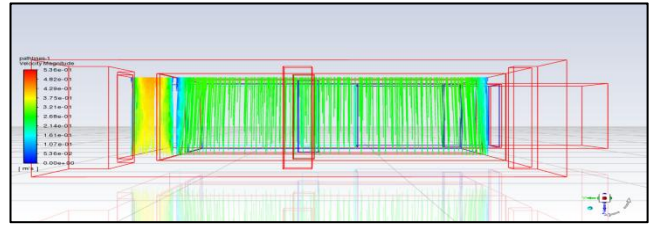


图3 空气龄模拟图

5 结论

通过对所选区域内的流动情况进行计算,得到了压力分布、速度分布、空气龄分布关于孔隙率变化的关系。综合以上分析可以得出:

(1) 工作区域压力和孔隙率关系较大,高架地板上下压差随着孔隙率的增加而减小。为了降低 FFU 能耗,推荐采用较高孔隙率的多空板。

(2) 由于中部区域存在一个回风夹道,工作区域空气流动的单向性较好,孔隙率对速度分布的影响不大。

(3) 空气龄随孔隙率的增加而增加,较小的孔隙率可以获得洁净的空气环境。

综合压力、速度、空气龄的分布,推荐采用本项目设计孔隙率及布置率的高架地板。

参考文献:

- [1] 张梅,霍金鹏.CFD 气流仿真模拟技术在洁净厂房项目中的应用[J].暖通空调,2022,52(S1):358-361.
- [2] 王福军.计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M].清华大学出版社有限公司,2004.
- [3] 孙辉.基于 CFD 的某工业车间气流组织优化研究[D].扬州大学,2023.
- [4] Dong L,Zhang K,Qian Z.The investigation of air temperature characteristics in large-span manufacture area of clean room[J].International Journal of Ventilation,2022,21(4).