

暖通工程师全面解析雷神山医院通风空调设计，告诉你如何做到避免交叉感染！

来源：中南建筑设计股份有限公司

如有侵权，请联系删除



编者按

武汉第二所专门用于收治新型冠状病毒肺炎患者的医院——雷神山医院火速建成的背后，凝聚着建筑师和工程师的智慧和力量。作为一所呼吸类临时传染病医院，如何确保医院内部的空调与通风设计为病人及医护人员提供安全的、舒适的就医及工作环境，如何避免因空气流通造成的交叉感染，又如何在通风系统中，进行过滤、杀菌、净化装置的设置和选择？暖通工程师需要考虑到方方面面。中南建筑设计院参与此次雷神山医院设计的暖通工程师就为你解读这所特殊时期、特殊条件下的传染病医院如何进行通风空调的设计。

01

项目建设背景

Background

2020 年跨年之际，一场突如其来的疫情从武汉波及全国，生命重于泰山，疫情防控牵动着每个人的心。抗击疫情工作启动以来，中南建筑设计院坚决贯彻落实党中央及湖北省委、省政府，中南设计集团各项工作部署，第一时间由主要领导牵头建立应急设计应对机制，以国企大院的使命和担当，充分发挥设计专业优势，全力以赴参与抗击疫情工作。疫情如火，刻不容缓，雷神山医院中南院暖通设计团队从 1 月 24 日晚接到任务，开始图纸设计，到 2 月 5 日开始验收，10 天 10 夜与时间赛跑，毫不松懈。3 天交付全部施

工图，全程在项目现场配合施工，突破常规，及时根据现场实际需要进行图纸优化，直至转入使用运维配合服务阶段。

02

项目概况

Introduction

雷神山医院建设用地面积约 **22 万 m²**，总建筑面积约 **7.9 万 m²**，整体规划按照传染病医院标准设计，设计用于收治已确诊的新型冠状病毒感染肺炎患者的医院。根据用地情况将东、西两区分别规划为隔离医疗区和医护生活区，并配备有相关运维用房，病床总床位数建设目标为 **1600 床**，可容纳医护人员约 **2300 人**。

隔离医疗区总建筑面积为 **52200m²**，为新建一层临时建筑，设有卫生通过单元、病区护理单元、医技单元、接诊区。护理单元为集装箱拼接式建筑，外形尺寸（长×宽×高）为 3m×6m×2.6m，室内净高 2.4m；医技区为钢结构板房建筑，建筑高度 4.5m。隔离医疗区北侧设有污水处理站、微波消毒间、垃圾暂存库、垃圾焚烧间、液氧站、正负压站房等配套设施。



03 | 雷神山医院 俯瞰效果图



| 雷神山医院 俯瞰实景图

03

通风空调系统设计原则

Design Principles

空调设计参数

设计空调室外参数主要考虑疫情爆发期间的武汉冬季气象条件并考虑预期气候条件。参照国家相关规范，病房区、医护区、医技区主要房间冬季室内设计温度为 $18\sim 22^{\circ}\text{C}$ ，主要病人及医护通道的设计温度不低于 18°C 。

空调通风系统

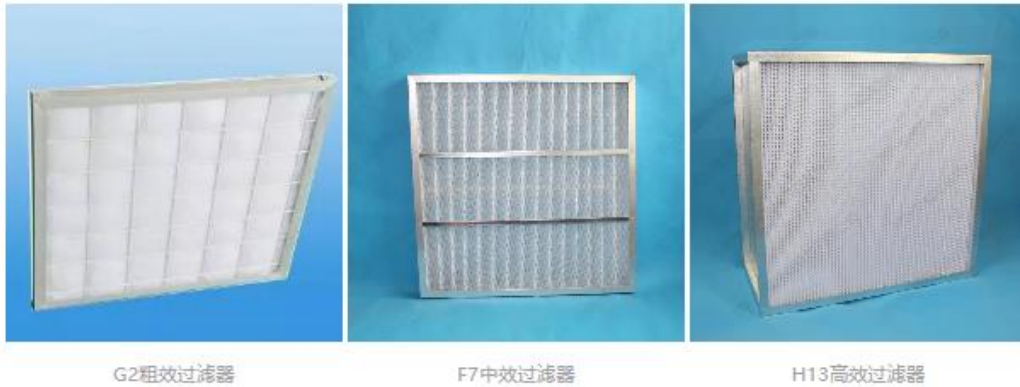
为避免交叉感染，病房区、医护区、医技区的主要房间均采用热泵型分体空调。医技区负压检验、负压 ICU、负压手术室采用直膨式全空气型净化空调机组全新风运行，送风管道设有电加热器。电加热器设置分档调节并采取无风断电保护措施。

漂浮在空气中或附着在灰尘颗粒上的病菌会附着在空调机组的盘管上，并随冷凝水排出，这些病毒可能导致人员致病。因此空调的冷凝水不应单独散排至室外，均分区集中收集，并应随各区污水、废水排放集中收集。

在通风空调设计中应致力于采用有序的压力梯度控制措施，合理控制气流流向，不同污染等级区域压力梯度的设置应符合定向气流组织原则，应保证气流从清洁区→半污染区→污染区方向流动。医护区相对传染区为正压，控制负压隔离病房、负压检验室室内负压值，避免洁净空气与污染空气的交叉，减少相互感染概率，有效阻断病毒传播，保证医护人员安全健康。负压隔离病房最小换气次数为 12h^{-1} ，污染区最小换气次数为

6h^{-1} ，清洁区最小换气次数为 3h^{-1} 。

所有区域送风系统设粗、中、高三级过滤保证送风洁净度，同时应采取有效的空气净化消毒措施，最大限度降低负压隔离病房等污染区的排风对周围环境的影响。送风过滤单元、排风高效过滤器前后设置压差检测、报警装置，当压差数值超过设定值时传感器报警，相应进行设备更换。



设备与材料

结合当前应急临时医院建设时间短、要求高，部分设备材料供应不满足建设工期要求的特点，因地制宜做好暖通空调的设计工作是我们重点考虑的问题。设计过程中团队派专人与各大设备供应商对接，尽量选用成熟可靠、库存量大、运输快速、厂商捐赠的设备，节省产品的采购、调货时间。同时方便施工单位快速安装、调试简单。选用的通风空调管道满足建设周期要求，制作安装简单，气密性好。通过上述措施，在保证系统运行可靠的前提下极大地缩短了施工周期。



部分厂商捐赠设备（向左滑动可查看更多图片）

部分厂商捐赠设备（向左滑动可查看更多图片）

04

病房区气流组织与压差控制措施

Control Measure

区域功能

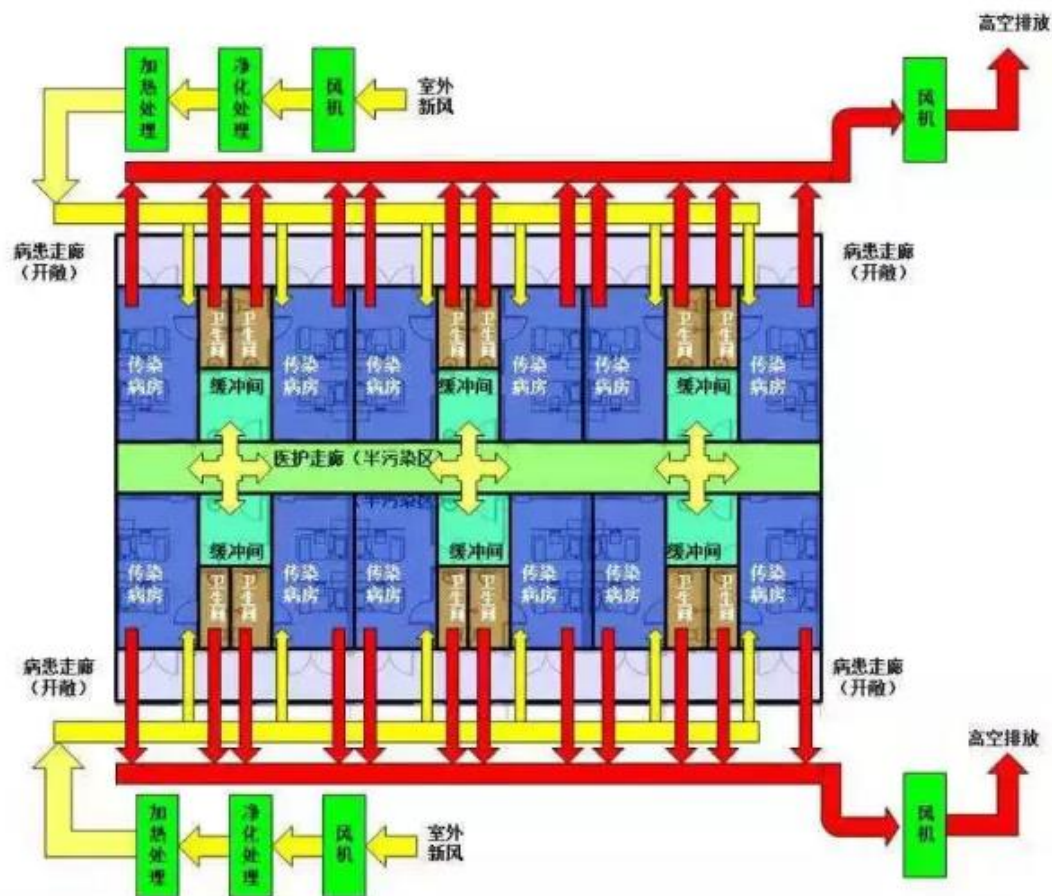
病房区主要由安置病人的负压隔离病房及其卫生间、缓冲间、医护人员通行的走廊等部分组成。

设计方案

负压隔离病房区域采取压差控制措施，保证气流从半污染区→污染区方向流动，病房维持 $-10\sim-15\text{Pa}$ ，相邻房间维持不小于 5Pa 的压力梯度。病房与医护走廊的墙面上装有显示不同区域压力差值的微压差计，便于医护和维护人员实时观察房间压力梯度与送排风系统运行是否正常。

污染区、半污染区分别设置独立的送/排风系统，风机采用低噪音高效离心风机箱且一用一备，排风口至距地 4.5m 以上。设计将 $5\sim 6$ 间病房及其卫生间合用一套送/排风系统，极大的方便了系统调试，同时有效保证了压力梯度，风机风量的合理控制也避免了风机

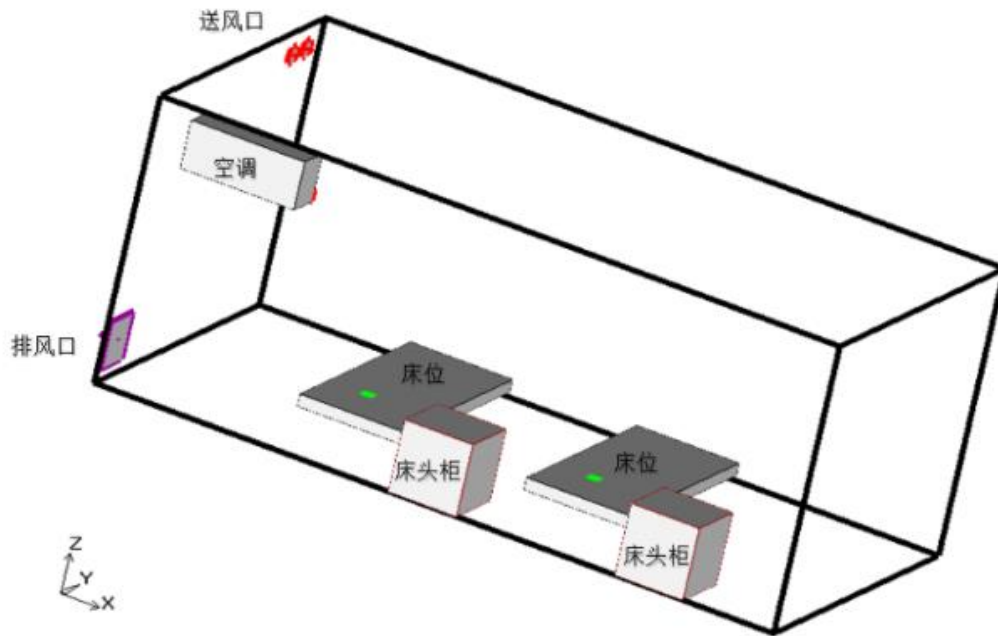
运行噪音和振动对病房人员的影响。病房区送/排风系统及气流组织示意图如下：



气流组织模拟

为检验病房气流组织设计效果，对病房的气流组织进行了模拟论证。

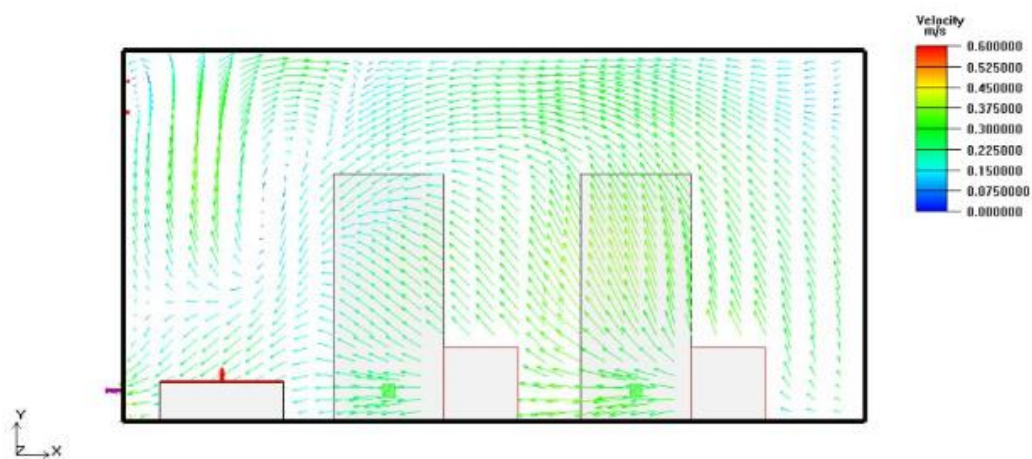
模型描述: 建立 5.8m×3m×2.4m(长×宽×高)的病房空间, 2 张单人床尺寸为 2m×0.9m, 床头柜尺寸为 0.6m×0.6m×0.6m, 分体空调室内机尺寸为 1.0m×0.4m×0.32m(长×高×深), 房间采用上侧送风下侧排风的通风系统, 2 个送风口尺寸均为 Φ150, 排风口尺寸 400mm×400mm, 三维物理模型如图所示:



三维物理模型示意图

三维物理模型示意图

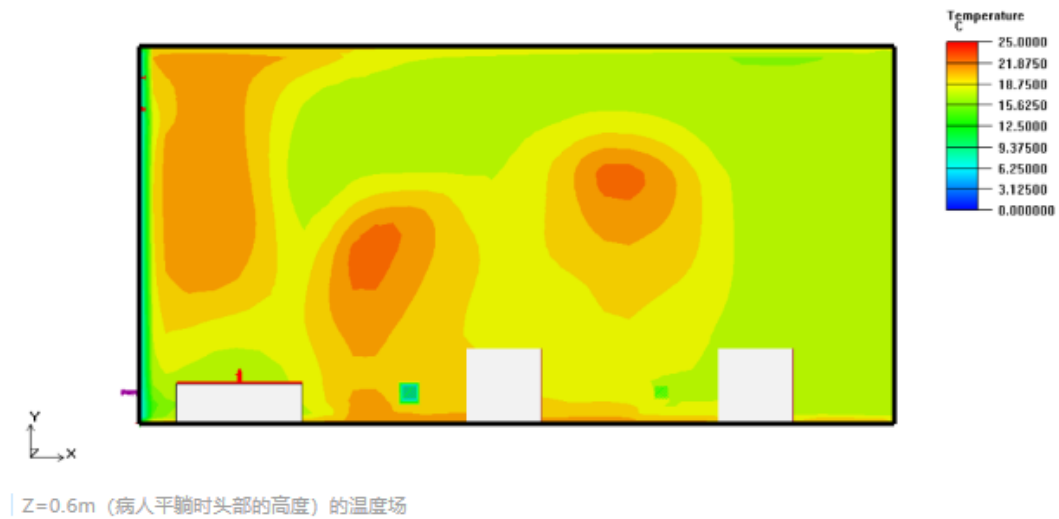
房间上部单个送风口送风量为 $250\text{m}^3/\text{h}$ ，总送风量为 $500\text{m}^3/\text{h}$ ，送风温度为 20°C ，水平送风；下部排风口排风量为 $700\text{m}^3/\text{h}$ ，水平排风。分体空调风量为 $1000\text{m}^3/\text{h}$ ，送风温度为 30°C ，斜向下 45° 出风。内墙和外墙分别依据房间温度和环境温度采用等壁温边界条件，计算中不考虑辐射模型。通过模拟得到如下结果：



$Z=0.6\text{m}$ (病人平躺时头部的高度) 的速度矢量图

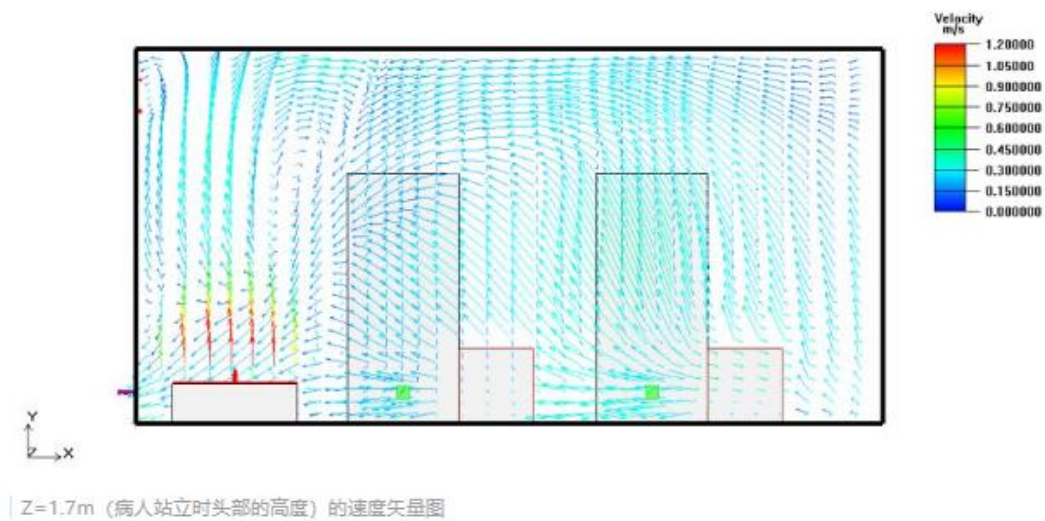
(1) 病房速度场和温度场

$Z=0.6\text{m}$ (病人平躺时头部的高度) 的速度矢量图

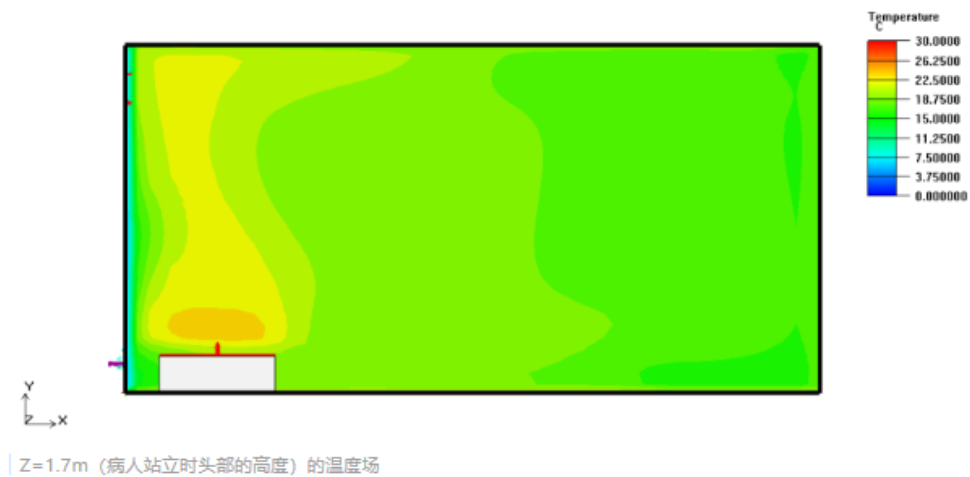


| Z=0.6m (病人平躺时头部的高度) 的温度场

病人平躺时，头部处的速度为 0.25~0.35m/s，温度为 19~22℃，满足舒适度的要求。

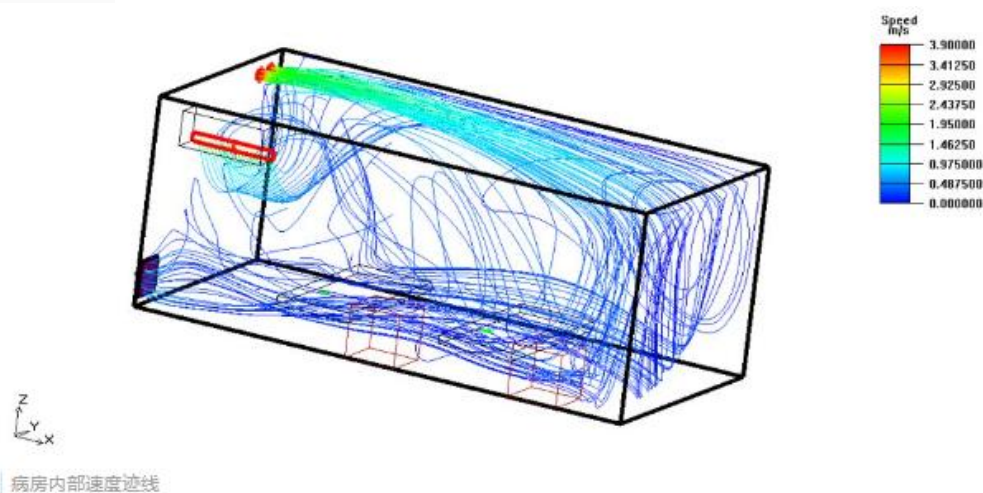


| Z=1.7m (病人站立时头部的高度) 的速度矢量图



| Z=1.7m (病人站立时头部的高度) 的温度场

病人站立时，病房内主要活动区（除空调出风口处）头部处的速度为 $0.3 \sim 0.5 \text{ m/s}$ ，温度为 $18 \sim 25^\circ\text{C}$ 。



(2) 病房内气流组织

| 病房内部速度迹线

通过模拟得到如图所示的速度迹线，由图可见，采用设计方案（上侧送风下侧排风）时床头处于回流区，整个房间易形成良好的定向气流，通风系统可以有效及时排除病房内污染气体。

安装与调试



负压隔离病房及其缓冲间的送/排风口布置应符合定向气流组织原则，防止送排风气流短路。送风口应设置在房间靠近医护入口上部的上侧，送风需经过粗、中、高三级过滤；排风口应设置在病房内靠近床头的下部并设高效过滤器，利于污染空气就近尽快排出且对周边大气环境不造成污染。



负压隔离病房及卫生间的送/排风管均由侧墙接入室内，减小管道对室内吊顶高度的影响，避免屋面开设太多洞口增加漏水隐患，管道穿墙处做好相应的密封处理有效保证房间气密性。医护走廊及缓冲间的送风管由医护走廊顶部进入后分别开设侧送风口，既减小了管道对走道净高的影响，同时避免管道穿越污染区，所有屋面洞口都做好相应的防水密封处理。



送/排风支管上均设置与设计风量匹配的定风量风阀，病房送/排风支管同时装有可单独关断的电动密闭风阀。



经过现场调试，各区域的压差值均在设计范围内，病房、缓冲间、医护走廊之间可以形成有效的压力梯度。

05

医护区气流组织与压差控制措施

Control Measure

区域功能

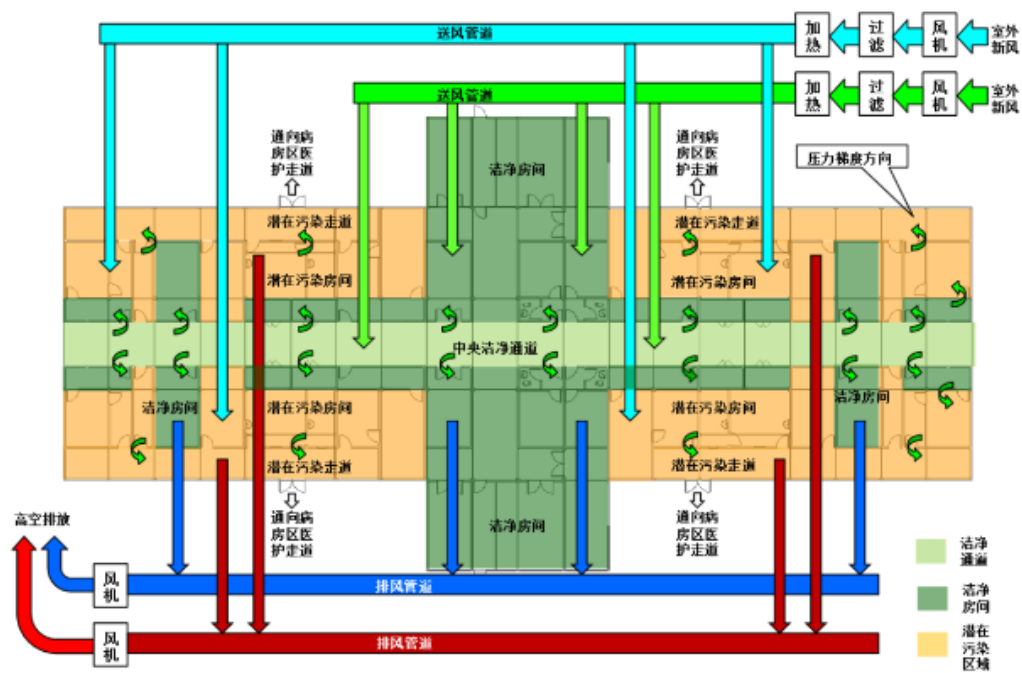
医护区由中央洁净通道连通，每个医护单元对应 4 个隔离病房单元。医护单元可分为洁净区（含中央洁净通道及与其连通的洁净房间）和潜在污染区（通向隔离病房区的走道及与其连通的房间）。

设计方案

医护区相对传染区为正压，有效阻断病毒传播，保证医护人员安全健康。通过合理的送/排风气流组织，保证整个医护单元为正压区域，同时保证气流从清洁区→潜在污染区

流动。送/排风系统支管设置定风量阀，通过送/排风量精准控制相邻房间不低于 5Pa 的压力梯度。

医护区的的洁净区和潜在污染区分别设置相应的送/排风系统，风机采用低噪音高效离心风机箱。每个送风系统均设置粗、中、高三级过滤，保证送入医护单位的空气洁净度，排风口至距地 4.5m 以上。医护区送/排风系统及气流组织示意如下图：



安装与调试

为了保证洁净区正压，除了按设计要求组织送排风，通过定风量风阀精准调控送排风风量外，还需注重房间密闭性。实际施工过程中，对维护结构间的缝隙、管线穿墙及楼板的缝隙都要做密封处理，不留死角。



06

医技区气流组织与压差控制措

Control Measure

区域功能

隔离区医技单元分为 A, B, D 三个区, A 区包括 28 床的负压 ICU、负压检验及其配套用房; B 区包括负压手术室、CT、超声、心电及其配套用房; D 区包括 33 床的负压 ICU 及其配套用房。

方案设计

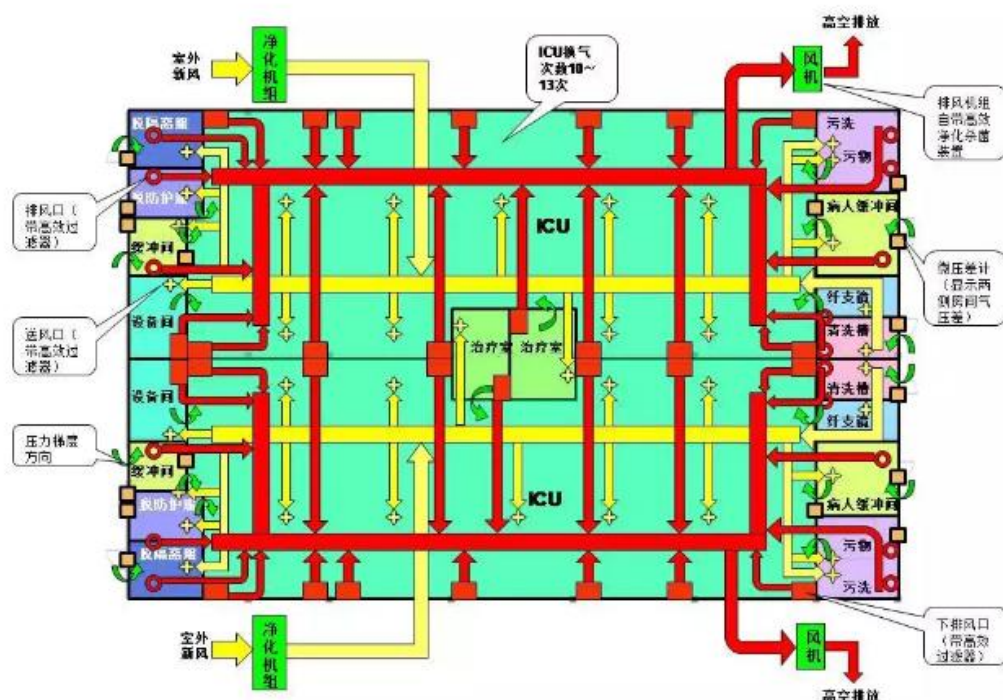
主要房间排风换气次数：1、负压检验/缓冲间 13h⁻¹；2、负压手术室 22h⁻¹，走廊/辅房

13h⁻¹；3、负压 ICU/缓冲间/辅房 13h⁻¹；4、CT、超声、心电及其配套用房 8h⁻¹。通过

送/排风量精准控制压力梯度，各主要区域压力梯度：1、负压检验：-20 Pa，缓冲间：-10Pa；2、负压手术室：-20Pa，复苏室/消毒打包/前室：-15 Pa，走廊/存床/医护前室/无菌间：-10Pa；3、负压 ICU：-20Pa，病人缓冲/污物/污洗/清洗槽/纤支镜/脱防护服：-15Pa，脱隔离服/治疗室/缓冲/设备间：-10Pa。

为方便快捷安装及调试，负压检验、负压 ICU、负压手术室采用直膨式全空气型净化空调机组全新风运行，送风管道加装电加热器，送排风机均采用低噪音高效离心风机箱。由于极短的供货周期造成直膨机供应商无法根据设计参与进行有针对性的生产，在设计过程中设计团队与供应商密切对接，将现有的库存产品参数与设计值进行对比并第一时间锁定各地库存设备，部分设备参数由于无法满足设计要求厂家第一时间对设备部件进行改造。

送风系统均设置粗、中、高三级过滤，其中负压检验、负压 ICU、负压手术室设高效过滤风口。所有区域排风经高效过滤器处理后高空排放，负压 ICU、负压手术室、治疗室、复苏室等房间设下排风口。以负压 ICU 为例，其送/排风系统及气流组织示意图如下图：



安装与调试



负压检验室



负压手术室



ICU



CT室



超声室



排风风帽

经过实际调试，各区域的温度及压差值均在设计范围内，负压 ICU、负压检验、负压手术室等重要区域内各房间之间均能形成有效的压力梯度。下图为负压检验室内温度、换气次数、压力梯度等参数的自检报告。

检验科自检报告			
	缓冲 1	缓冲 2	大厅
风口数量 (个)	1	1	18
温度(℃)	22	22	22
相对湿度(%)	43	43	43
换气次数 (次/h)	13	12	16
大厅对缓冲 1 压力 (Pa)	/	/	13
大厅对缓冲 2 压力 (Pa)	/	/	15
对大气压力 (Pa)	11	11	26
照度 (lx)	165	173	258
江苏环亚医用科技集团股份有限公司测试部			
检验科自检报告			

检验科自检报告

07

医用气体系统设计原则

Design Principles

设计方案

医院设置氧气、负压吸引、压缩空气等医用气体，管网系统由管道、设备带、仪表、阀门及终端等组成。病房氧气终端用量按 40~80l/(min·床)，终端压力按 0.4~0.45MPa 确定；负压吸引终端用量按 30~80l/(min·床)，终端压力按-0.03~-0.07MPa 确定；压缩空气终端用量按 15~25l/(min·床)，终端压力按 0.4~0.45MPa 确定。氧气气源采用液氧罐，并预留罐车临时供氧的接口。需根据应急临时传染病医院的使用要求，充分考虑氧气用量。共设 6 个 20m³ 液态氧储罐，液氧总储量 120m³；每个储罐

配置 1200m³/h 的汽化器，总汽化量 7200m³/h，保证医院整体氧气供应量。

负压系统由真空泵、水汽分离器、负压真空罐、仪表及管道阀门组成，负压吸引装置的排气经过高效过滤器过滤并消毒灭菌后排出。压缩空气系统由压缩空气设备源与压缩空气管网系统组成，配置的螺杆式压缩空气组二用一备。



室外液氧站



压缩空气机房



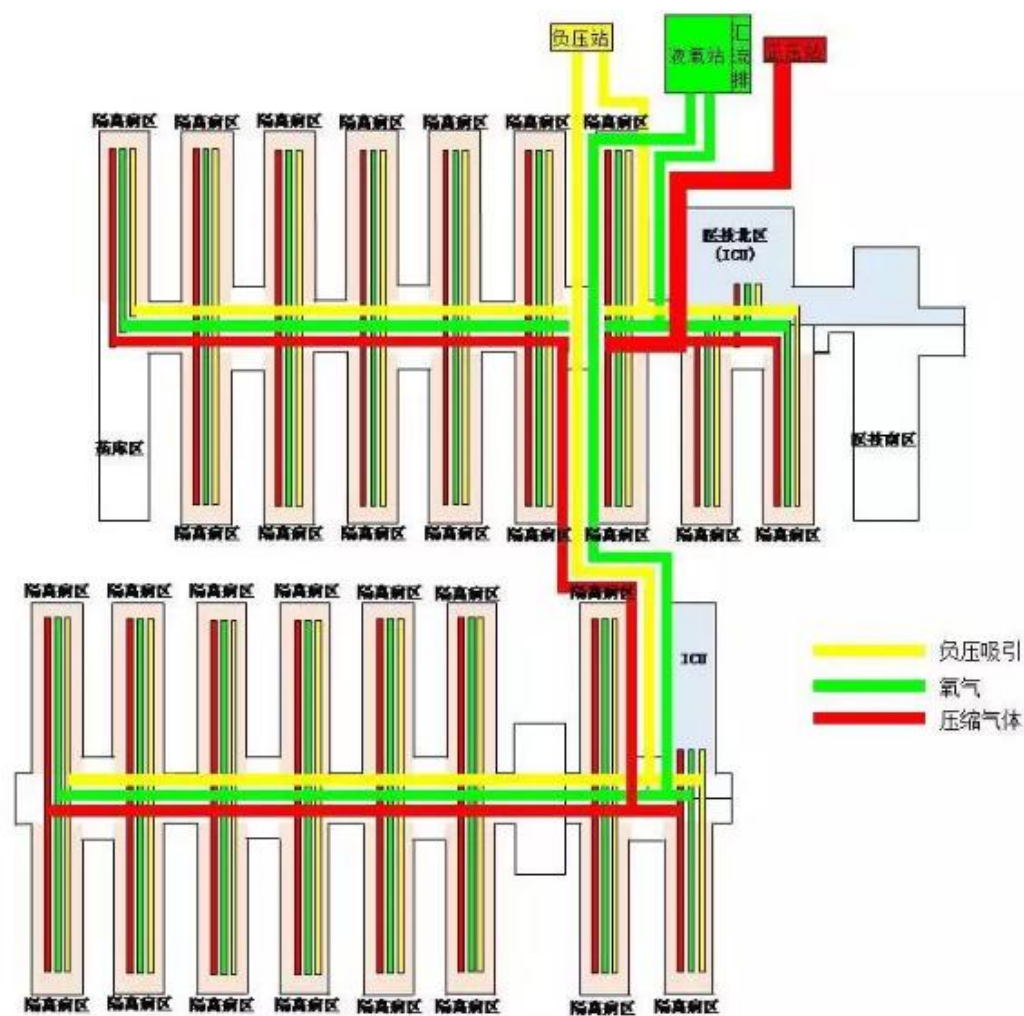
负压吸引气机房



病房医用气体设备带

室外管网布置

氧气、负压吸引、压缩空气主管道由机房接出后埋地进入隔离病区内。隔离病区内医用气体主管主要铺设于医护区屋面，各病区分支管穿越各自屋面后进入相应区域内。南北区各分别设置一根 DN150 的氧气总管及 DN80 负压吸引总管，各区氧气总管间设有旁通管，接入各护理单元的医用气体分支管上设有阀门。既可保证不同区域分批使用互不干扰，同时管道间互为备用有效提高供氧系统可靠性。总图医用气体管道示意图如下：



安装与调试



目前各用气区域已经陆续通气，氧气输送管道压力平稳，输送量较为稳定。液氧贮罐及汽化器根据实际使用量分批投入使用，可有效保证氧气供应量。

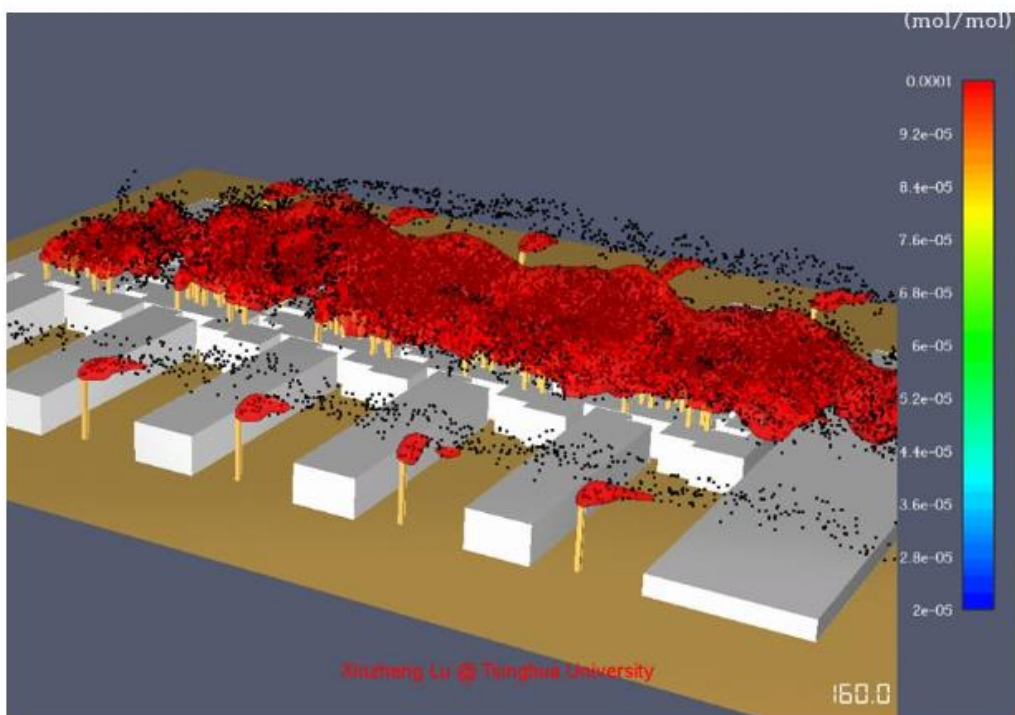
08

负压隔离病房废气排放 对环境的影响模拟分析

Analysis

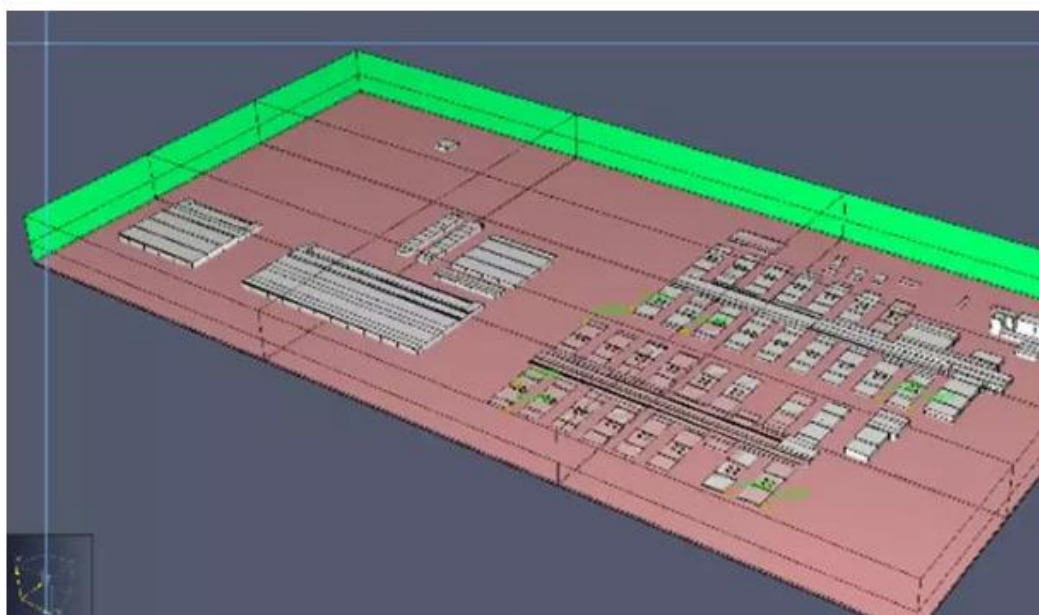
模拟方案

在设计过程中为充分评估污染区废气排放是否对项目周围环境造成影响，设计过程中得到清华大学陆新征教授及团队的大力支持。陆新征教授及团队提出了临时医院排风环境影响的快速模拟方法。本方法以开源流体力学计算软件 FDS 为基础，实现了临时医院建筑的快速建模。基于云计算平台的分布式计算以及有害空气流动的监测和可视化，为临时医院设计阶段的快速分析提供了专门工具。



有害气体轨迹及浓度等值面图

有害气体轨迹及浓度等值面图



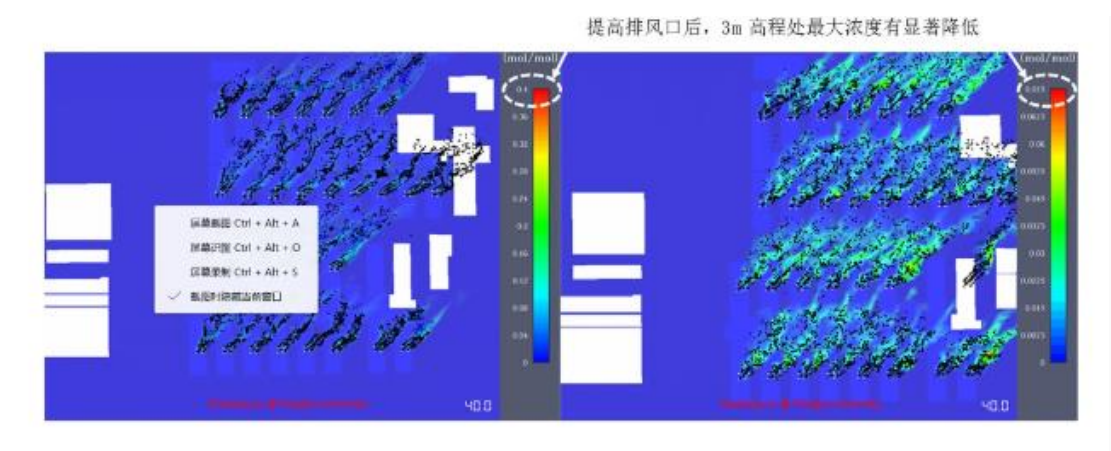
雷神山医院三维FDS模型

雷神山医院三维 FDS 模型

主要结论及对设计的指导

1. 根据江亿等研究,对于 SARS 病毒,稀释 1 万倍后不再具备传播性。模拟结果证明 4.5m 排风口高程可以满足要求新风口空气稀释 1 万倍的要求。
2. 将排风口高程提高到 4.5m 后,可有效降低新风口高程面 (3m) 污染空气相对浓度。

3. 为确保负压隔离病房区域医护人员的安全及保护室外环境，本项目送风系统采用粗效（G2）+中效（F7）+高效（H13）三级过滤，排风系统采用高效（H13）过滤后接至 4.5m 高空排放，设计方案符合模拟预期。



09

结 语

Epilogue

此次雷神山医院暖通设计先经过专业评审确定技术方案，边设计、边校对、边审核、边修改，提高工作效率，避免返工，合理稳妥的设计方案就是雷神山医院建设的最大保障。在项目施工过程中积极主动与项目建设各方沟通配合，不分白天黑夜每天派有经验的设计师驻场巡检，第一时间发现和解决施工环节中存在的问题，同时对重点难点处的施工予以现场指导。在疫情发展迅猛、项目建设周期极短、设备采购压力极大的背景下，设计团队的每个人顶住压力，迎难而上，为有力抗击疫情作出了自己应有的贡献，用中南院暖通人的专业水准和职业操守为雷神山医院的顺利建设保驾护航。



雷神山医院暖通设计团队：

负责人：

张银安（建筑综合设计院总工程师）

刘华斌（机电一所总工程师）

机电顾问：马友才（公司副总工程师）

机电协调人：许玲（机电一所所长）

工程师：曹晓庆 徐峰 吕中一 王哲 刘思伦 余能辉 江一峰 宋涛 任中杰