



多联风管机提升新型控温辐射洁净手术室性能

同济大学附属上海市肺科医院 陈瓚

同济大学 沈晋明 刘燕敏

摘要：控温辐射洁净手术室是洁净手术室技术创新之一，但传统水介质辐射板存在调节响应慢、供冷能力受限等不足。本文剖析辐射换热在手术室环境控制中的机理，提出采用空气介质空腔辐射围护，以多联风管机作为辐射循环机组，辅以周边送风口拓展辐射换热面积，配合送风温差不大于 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的控温送风策略，兼顾手术室内医患、麻醉不同人员的热舒适。依托现有病房改造洁净手术室的实际项目，验证水-氟复合系统的工程效果。结果表明，该技术方案可在建筑空间受限条件下完成辐射手术室建设，系统调控速度、热舒适性均得到改善，为国内同类洁净手术室改扩建项目提供技术参考。

关键词：控温辐射洁净手术室；多联风管机；控温送风；热湿负荷；医院改造工程

0. 引言

2026 年 7 月住房和城乡建设部批准国家标准《医院洁净手术部建筑技术规范》GB50333-2013 局部修订的条文，自 2026 年 11 月 1 日起实施。标准名称修改为《医院洁净手术部建筑技术标准》^[1]（以下简称《标准》）。《标准》最被关注的是认可与推荐新型的洁净手术室，在第 1.0.4 条文提出“洁净手术部设计宜留有发展余地，满足灵活性与通用性设计要求，适应将来改建或扩建需要。”强调留有发展余地，满足灵活性与通用性设计要求，推动洁净手术室建设领域技术创新与模式变革^[2]。控温辐射洁净手术室便是该背景下应用较多的创新技术之一^[3]。

1. 辐射洁净手术室

辐射壁面作为一项技术措施，以实现《标准》提出的“洁净手术室净化空调系统宜能够在送风温度低于室温状况下运行”。控温辐射手术室是进一步拓展辐射换热功能的新型手术

室^[3]。

1.1 辐射手术室优点

传统手术室送风装置采用统一送风温度与送风速度向手术区域送风，室内温湿度由手术医护人员按需调节。医护人员身着密闭无菌手术衣、作业强度高，通常会将室内温度设置为21℃-22℃，但该温度会使麻醉状态下的患者体感寒冷，易诱发术中低体温，提升术后感染风险，临床往往需要额外配置空气保温毯等设备进行防护。对于老年、儿童患者，或是长时间手术场景，医患热舒适矛盾会进一步凸显，成为手术室环境控制的突出难题。

辐射换热技术为化解上述环控矛盾提供可行路径。辐射空调具备三大核心优势：可利用低品位热媒、降低送风量、提升人体热舒适性。从传热机理来看，空气中占比最高的氮气、氧气等双原子对称分子几乎不吸收热辐射，可视作透热介质，空气本身无法依靠辐射换热改变自身温度，仅能通过和辐射壁板表面对流换热实现温度变化。辐射换热直接作用于人体表面，只要充足的辐射换热量即可实现人体热舒适调节。医护人员处于站立姿态，辐射换热接触面积大，冷辐射降温效果明显；麻醉医师坐姿作业、手术患者平躺，二者有效辐射换热面积依次减小，获得辐射换热量相应降低。按热湿分理的特性，手术区上方层流送风主要承担除湿功能，适当降低送风温差，同一套送风系统即可同时满足医护、麻醉人员与患者差异化的热舒适诉求。

理论上辐射空调能够利用低品位热媒（如高温冷冻水或低温热水），可以减少送风量，提高热舒适性的优点，但对于洁净手术室，室内洁净度级别实现除了末端过滤器效率外，主要靠送风量（或换气次数、或层流风量），这就是说对于同一级别的洁净手术室，送风量不可能减少。至于低品位水构成的辐射板壁，多用于室内热湿负荷较为稳定的住宅或办公室等，不适宜室内热湿负荷变化较大的工艺空调（如手术室）。

1.2 辐射手术室不足

受空气透热体的物理特性限制，辐射换热无法直接改变空气温度，只能依靠辐射壁面与空气之间的对流换热逐步调节室温，空气温度响应速度慢。手术过程因间歇或轮替使用电热或电动设备，使室内热湿负荷持续动态变化，仅依靠辐射方式难以稳定维持室内温湿度，仍需要手术区上方的送风参与调节，即控温，当然调节幅度有所收窄。

尽管医护人员可通过改变壁面辐射温度获得舒适体感，但传统冷辐射方案在手术室实际落地效果并不理想。为避免辐射壁面结露，冷辐射壁表面温度需高于室内空气露点温度0.5℃-1℃，同时又要低于室内空气温度，壁面可调温度区间十分有限，直接约束系统供冷能力，本文主要围绕冷辐射工况展开分析。

传统水介质辐射板，水的比热容大，改变供水温度需要消耗大量冷热能量，系统响应滞后。因此传统水介质辐射空调暴露出诸多问题：供冷能力受限、室温调节时延大，难以快速抵消手术过程持续产生的动态显热负荷；洁净手术室又不能削减送风量，最终造成系统造价与运行能耗同步抬升。

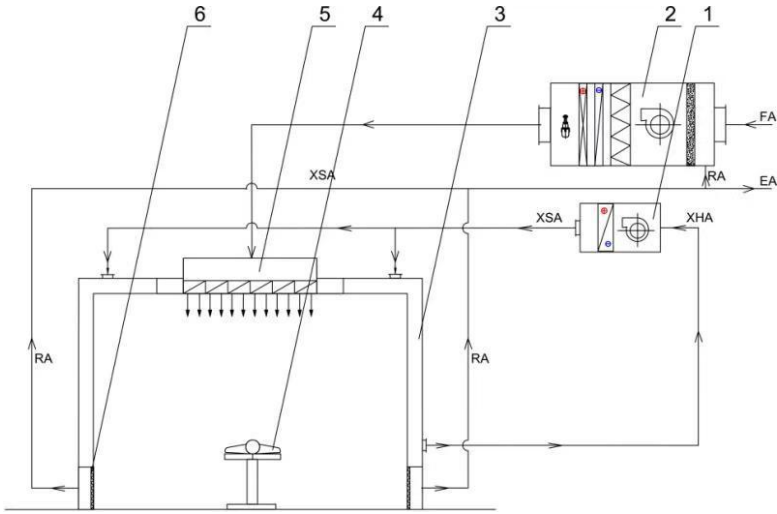
辐射换热量除和壁面温度相关外，还取决于有效辐射换热面积。现代手术室内设备密集，围护壁面大量嵌入存放柜、保温保冷柜、操作显示屏、记录终端等设施，各类悬挂大屏、落地设备进一步阻隔人体与辐射壁板之间的辐射换热。大型手术室中可用于辐射换热的有效壁面面积被大幅压缩；即便借用顶板作为辐射面，手术区上方布置硕大的层流送风装置，手术人员与患者处于送风装置下方，同样无法获得有效的冷辐射作用。

2. 提高手术室辐射换热性能措施

若要改善辐射空调的响应速度与调控性能，可从增大有效辐射面积、加快壁面温度变化速率两个方向入手，而传统水介质辐射板很难实现上述目标，需要采用创新方案^[4]：

2.1 更换辐射板换热介质，摒弃比热容大的水介质，改用比热容小的空气作为换热介质

将手术室围护结构改造为带空腔的板壁，向空腔内输送可调温空气实现腔内自循环，构建温度响应迅速的空气介质辐射板壁，系统原理如图 1 所示。



1.循环风空调机组，2.集中净化空调机组，3.中空隔层板壁，4.手术床，5.层流送风装置，6.回风口

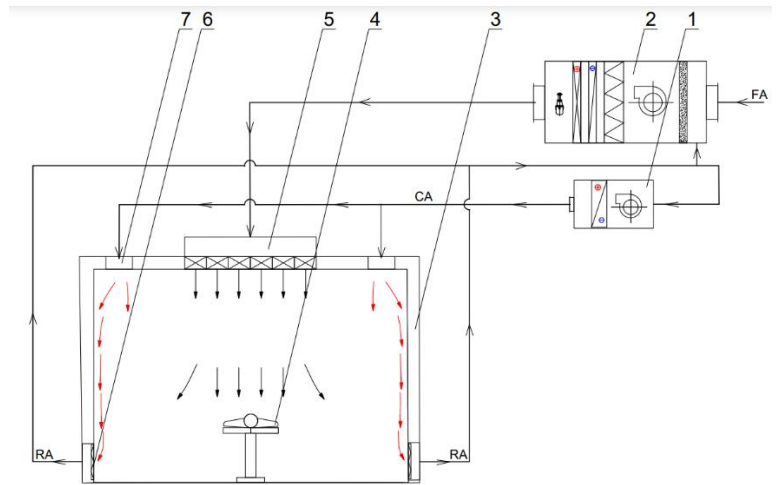
图 1 空腔辐射洁净手术室[4]

2.2 提高图 1 中循环空调机的调温速度也是提升辐射空调的响应能力的措施

由于循环空调机组仅仅是调温作用，完全可以用多联风管机替代传统水介质空调机组。由于多联风管机冷媒调温速度优于传统空调机组的水介质，有利于提高辐射空调反应速度。

2.3 要提高辐射空调供冷量，辐射壁面面积是重要因素

设计时要考虑辐射壁面的面积。限于如上所述的壁面与天花条件制约，创新的思路就是将壁面上嵌满了各种存放柜、保冷柜、保温柜、显示屏、控制面板及电脑记录台等装置的外表面都变成辐射板。依次思路，可创新在手术室四周围护板壁前上方周圈分散设置送风口，使送风气流贴附流经围护壁板（见图 2），降低了所有嵌入的装置外表面温度，形成了温度可调的装置外表面辐射，我们称为“腔外辐射板壁”，同时这些四周送风口会以对流与辐射形式消除显热负荷，环控效果更佳，特别适用于面积较大的高级别手术室^[4]，如多功能复合手术室。这契合《标准》第 8.2.1 条文“且需要增大上述送风面积时，出风面积增大的比例不应超过手术室净面积增大的比例，也可以在室内的设备通道区及其以外地区设分散送风口。”的规定。



1.循环风空调机组，2.净化空调机组，3.围护板壁，4.手术床，5.层流送风装置，6.回风口，7.周边送风口

图2 围护内表面（腔外）辐射洁净手术室^[4]

3. 新型辐射洁净手术室实施案例

上海市某三甲医院因业务需要将6号楼三层的7间病房改造为3间洁净手术室，一间Ⅲ级洁净手术室与两间为Ⅰ级洁净手术，其中一间Ⅰ级洁净手术室定位为辐射手术室。该改建工程由上海尧伟建设工程有限公司承担。

3.1 改建工程的痛点

本改建工程存在多项制约条件：1）原病房层高仅4.5 m，无专用技术夹层；2）楼层原有四管制多功能热泵冷热水供给容量，无法满足手术室空调负荷需求；3）按照传统方案，Ⅰ级洁净手术室需要配置集中新风机组、独立循环机组及配套管路（见图3）^[5]，但建筑现场没有充足空间布置整套设备机组及其管路。

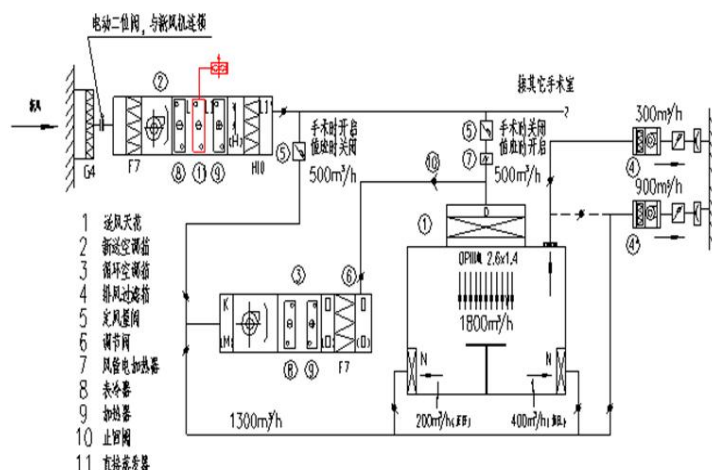


图3 《标准》推荐的洁净手术室系统

3.2 改建工程的对策

根据上文的技术思路，针对三大痛点制定对应解决方案：

1）合适配置水系统与氟系统机组：原有四管制多功能热泵的冷热水仅供新风机组，并配置直膨式盘管做深度处理，降低机器露点，实现湿度优先控制^[6]，承担全部湿负荷。同时也降低了集中供给的冷热水容量需求。洁净手术室各自配置的自循环空调机采用直膨机。直膨循环空调机组不仅体积紧凑，冷媒配管管径小、无敷设坡度要求，现场安装便捷。

2）合理利用原建筑空间：新风机组、循环机组统一布置在手术室相邻的空调机房内，仅将送风管接入手术室吊顶，回风管直接接回机房。

3）辐射洁净手术室的四周空腔围护的循环空调机组，由于只需调温的单一功能，直接采用多联风管机末端，由于体积小配管筒便可直接设置在吊顶。多联风管机的运行参数输出可以将辐射壁面温度实时导入手术室控制面板（见图4），显得整个辐射手术室布局简洁大方（见图5）。



图 4 辐射手术室控制面板显示辐射温度 图 5 简洁辐射手术室内景显示足够的辐射壁面

4) 所有洁净手术室均按《标准》采用手术室上部集中送风,配 HEPA 过滤器,平行于手术床长边的双侧墙设下侧回风,配 F6 低阻中效过滤器;手术床顶部位置设顶部排风,配 G4 粗效过滤器(见图 5)。

3.3 改建工程运行验证

改建工程于 2026 年 3 月一次性通过了竣工验收并投入使用。文献 7 对辐射手术室及其运行做了全面、综合性评价,不再赘述。但该改建工程采用水系统与氟系统有机结合的净化空调系统,以及辐射腔壁循环机组采用多联风管机,能以相对经济的改建成本、在有限空间内实现了 7 间病房改建为带有 3 间洁净手术室及辅房的洁净手术部。

经过近 5 个月的运行实践验证了这套系统合理、运行稳定、节能效果良好。特别是采用多联风管机的辐射壁循环机组,提升了辐射空调供冷能力与动态相应速度,显著改善了辐射洁净手术室性能。相比另一间传统的 I 级洁净手术室,临床手术团队感觉在辐射洁净手术室进行手术更舒适。这是因为辐射换热,可以降低层流送风温度,尽管两间手术室层流送风量与截面风速相仿,因辐射洁净手术室的送风温度高而使手术团队减弱了冷风感,提升了舒适度体验。

4. 结语

控温辐射洁净手术室是一种新型的手术室环境控制方案,若要使传统的辐射空调适用于洁净手术室必须开展针对性技术创新,以空气介质替代传统水介质作为辐射板换热介质,降低换热介质比热容,减少壁面调温所需冷热负荷;循环介质调温机组改用氟系统,以此提升系统动态响应速度。多联风管机设备体积小、管路系统简单,是空腔辐射循环机组的优选设备。

对于多功能复合手术室这类高级别手术室,壁面嵌入的大量柜体设备挤占有效辐射面积时,可增设周边分散增设送风口,将柜体、设备外表面转化为辐射换热面,依靠对流与辐射协同消除显热负荷,优化室内环境控制效果。

本文案例采用水-氟复合净化空调系统,利用多联风管机作为辐射空腔循环机组,在空间有限的改造项目中,以较低投资实现含控温辐射洁净手术室的洁净手术部工程落地,是具备推广价值的手术室改造技术路线。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部关于发布国家标准《医院洁净手术部建筑技术规范》局部修订条文的公告[EB/OL]. (2026-07-17).
https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2026/art_22c332d3d99c404ca863c16951f1ccd2.html
- [2] 沈晋明,刘燕敏《21 世纪手术环境控制发展与创新》[M].同济大学出版社,上海,2021 年
- [3] 刘燕敏,刘先荣,一种新型的洁净手术室控温送风系统 [J].中国医院建筑与装备, 2021(4):35-38
- [4] 刘燕敏,胡崔健,用于层流手术室定温送风的净化空调系统[P].专利号: ZL2020 1 0063365.4, 授权公告日: 2022 年 9 月 9 日, 授权公告号: CN 111237901 B
- [5] 沈晋明,刘燕敏,GB50333-2013《医院洁净手术部建筑技术规范》编制思路[J].暖通空调, 2014, 44(4): 41-47.
- [6] 沈晋明,聂一新,洁净手术室控制新技术: ‘湿度优先控制’ [J].洁净与空调技术, 2007(3):17-20.
- [7] 洪诗婕,任祺,朱永松. 辐射空调在手术室本土化应用对医患的影响分析[J]. 中国医院

