

文章编号: 1671-6612 (2025) 04-572-06

四川省肿瘤医院质子治疗中心暖通空调设计

王继永 郭文成

(中国建筑西南设计研究院有限公司 成都 610040)

【摘要】 以四川省肿瘤医院质子治疗中心项目为案例, 讲述质子中心的暖通空调系统设计, 包含工艺冷却水系统、工艺空调通风系统、辐射屏蔽与防护措施、节能和 BIM 应用等, 为将来质子中心的暖通设计提供参考。

【关键词】 质子治疗中心; 工艺冷却水系统; 工艺空调通风系统

中图分类号 TU834 文献标志码 A

HVAC Design for the Proton Therapy Center of Sichuan Cancer Hospital

Wang Jiyong Guo Wencheng

(China Southwest Architecture Design and Research Institute Co., Ltd, Chengdu, 610040)

【Abstract】 Taking the proton therapy center of Sichuan Cancer Hospital as a case, this paper elaborates on the design of HVAC system in the proton center, including the process cooling water system, process air - conditioning and ventilation system, radiation shielding and protection measures, energy - saving aspects, and the application of Building Information Modeling (BIM). This paper aims to provide references for the HVAC design of proton centers in the future.

【Keywords】 Proton Therapy Center; Process cooling water system; Process air-conditioning and ventilation system

0 引言

质子治疗系统是目前国际社会公认的尖端放疗技术, 与传统 X 射线不同, 质子射线束入射人体组织后存在集中沉积能量的布拉格峰, 将最大剂量对准肿瘤病灶, 有效减少对周围健康组织的损伤^[1]。近年来质子治疗中心在建和拟建的项目越来越多, 暖通空调及工艺冷却水系统等质子治疗支持系统的设计也引起研究和讨论^[2-6]。目前可供设计参考的工程案例仍较少, 且多围绕冷热源和节能展开, 缺乏对暖通空调系统整体设计方案和设计注意事项的介绍, 另外不同供应商的质子治疗系统对工艺冷却水及室内温湿度环境存在差异性需求。本文以四川省肿瘤医院质子治疗中心项目为例, 介绍质子中心暖通空调系统的整体设计方案和设计注意事项, 为后续类似项目的建设提供参考。

1 工程概况



图 1 质子治疗中心鸟瞰效果图

Fig.1 Bird's-eye view of the Proton Therapy Center

本项目为四川省肿瘤诊疗中心质子治疗中心, 位于成都市天府新区, 是西南地区首家质子放射治疗系统获批单位。如图 1 所示为项目鸟瞰图, 规划总建筑面积约 14000 平方米, 其中地上建筑面积约 2500 平方米, 主要功能为接待服务大厅和办公区。

地下建筑面积约 11500 平方米, 主要功能为质子设备区和治疗用房, 以及配套设备管理用房等。

图 2 为地下二层(质子核心治疗层)的建筑平面示意图, 包括回旋加速器大厅、能量选择及束流传输通道、固定束治疗室和旋转机架治疗室等房

间。质子治疗系统的供应商为比利时亿比亚(IBA)公司, 回旋加速器型号为 C230, 能量范围为 70~230MeV, 束流强度范围为 70~230nA, 能够提供笔形束(PBS)、均匀照射(US)和双散射(DS)3 种治疗模式。

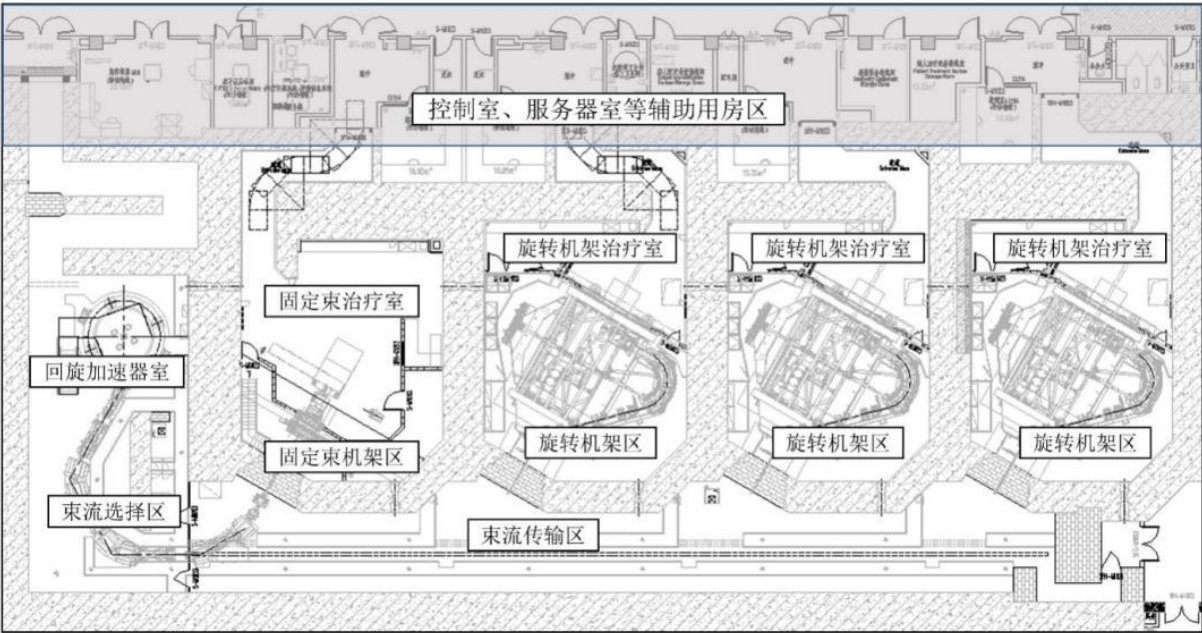


图 2 质子治疗中心地下二层(质子治疗层)平面图

Fig.2 Floor plan of the second basement level (proton therapy level) of the Proton Therapy Center

患者治疗时的医疗流程: 在医生指导下更衣并进入质子治疗室, 按照治疗计划规定的体位躺于治疗床上, 采用专用的固定装置对患者进行固定并摆位, 进行质子束照射治疗, 完成治疗后离开。

2 工艺空调

工艺空调区域主要为回旋加速器室、束流选择和传输区、治疗室、机架区及配套用房, 表 1 和表 2 分别为各房间室内设计参数和室内设备散热量, 房间温湿度要求保持相对稳定。

表 1 工艺空调区域室内设计参数

Table 1 Indoor design parameters of process air-conditioning areas

房间名称	夏季		冬季	
	温度/℃	相对湿度/%	温度/℃	相对湿度/%
回旋加速器和束流选择、传输区	22±2.5	50 (35~60)	22±2.5	45 (35~60)
固定束治疗室	22±2.5	50 (40~60)	22±2.5	45 (40~60)
旋转束治疗室和机架区 (PBS)	22±1.5	50 (40~60)	22±1.5	45 (40~60)
旋转束治疗室和机架区 (DS)	22±1.5	50 (40~60)	22±1.5	45 (40~60)
质子设备配电房	22±2.5	50 (35~60)	22±2.5	40 (35~60)
质子服务器室、总控制室、控制室、TPS/OIS 机房、 维修室、储藏间、水冷间等	22±2.5	50 (40~60)	22±2.5	45 (40~60)

注: 相对湿度括号内为控制区间, 括号外为设计基准值。

表 2 工艺空调区室内设备散热量

Table 2 Heat dissipation of indoor equipment in the process air-conditioning areas

房间名称	设备散热量/kW	房间名称	设备散热量/kW
回旋加速器区域	9	固定束治疗地下机架区	3
束流选择区（ESS）	2	主控室	2
束流传输区（BTS）	2	治疗控制室	2.5
旋转机架区	3	质子设备配电房	60
旋转机架治疗室	2	质子服务器室	9
旋转机架拽线间	2	TPS/OIS 服务器机房	9
固定束治疗室	2	水冷间	5

治疗室采用多联机空调系统，各房间均设置两台以上室内机，连接至不同的多联机室外机，以提高设备故障检修时的备用性。从运行可靠、方便调试角度考虑结合本项目场地条件，其余工艺空调区域均采用风冷型恒温恒湿空调，每台机组均配置双压缩机。设备选型时均留有不低于 20%的冗余量。质子服务器室和 TPS/OIS 服务器机房的空调系统接入应急保障电源。旋转机架区为三层通高的高大空间，房间面积 95m²，净高约 11.5m，为避免垂直方向产生较大温度梯度影响钢结构机架，恒温恒湿空调气流组织在垂直方向分三层送风、底部回风。

质子设备的安装调试周期一般在 1 年左右，温度变化过大会导致质子设备出现热胀冷缩，同时机架区存在较多的裸露钢表面，必须降低湿度避免腐蚀。因此设备厂家要求，质子设备用房区域的空调通风系统在质子设备安装调试前就要开启并连续运行，保证室内环境参数满足要求并经过其验

收。

3 工艺通风

质子束流形成、加速、引出、输出以及为了达到治疗目的而对束流能量和截面进行调整的过程中，都会有束流损失，束流损失产生的大量中子是辐射环境污染的主要来源^[7,8]。根据《放射治疗辐射安全与防护技术要求》HJ 1198^[9]和《放射治疗放射防护要求》GBZ 121^[10]的相关要求，质子治疗用房排风换气次数不低于 4 次/h，气流组织上送下排、对角设置，有效降低有毒有害气体的浓度。质子治疗用房均设置独立的新、排风系统，排风换气次数如表 3 所示，对非质子医疗工艺区的相邻相通房间维持不小于 5Pa 负压防止有害气体外溢。治疗室与机架区之间设有连通门，机架区负压程度高于治疗室，气流由治疗室流向机架区，束流传输通道与机架区相邻不相通。

表 3 工艺通风换气次数

Table 3 Air - change rate for process ventilation

区域	排风量/(m ³ /h)	换气次数/(次/h)
回旋加速器室、束流传输通道	400/10000（平时/检修）	0.3/6（平时/检修）
固定束治疗及机架区	1900	4
旋转束治疗及机架区（PBS）	5800	4
旋转机架区（DS+PBS）	8100	6

回旋加速器室分平时和检修两种工况，平时无人员进入时仅维持负压，放射性气体在室内自然衰变减少外排气体对室外环境的污染，换气次数降低的同时也可降低空调能耗。检修状态时有人员进入，提前加大换气次数至 6 次/h，快速降低室内污染物浓度。旋转机架区分为单独笔形束（PBS）和双散射+笔形束（DS+PBS）两种治疗模式，后者质子束照射

剂量较高，将换气次数提高到了 6 次/h。质子设备用房通风换气次数较大，为保持室内空间温湿度稳定，新风经处理达到室内状态点后再送入室内。

质子治疗用房的排风按环评单位意见采用活性炭过滤处理后在建筑屋顶排放，排放点高度约 10m，顶部设置锥形风帽，总管处设置辐射监测装置。

4 工艺冷却水

回旋加速器、真空泵、能量选择系统设备、固定束和旋转束机架及出束装置等质子设备运行过程中会产生大量余热,为稳定运行需要提供工艺冷却水为其散热,待机状态也需要提供。除质子设备检修时间外,工艺冷却水系统全年连续运行。工艺冷却水系统最大消除散热量为1010kW,待机时消除散热量约为200kW。

与质子设备直接接触的冷却水需采用高纯度去离子水,同时质子设备会对冷却水产生辐射活化作用,因此工艺冷却水系统设置板换热器采用两级冷却。一次侧为高温侧,直接循环接触冷却质子设备,采用高纯度去离子水。二次侧为低温侧,冷源采用冷水机组和闭式冷却塔。图3所示为工艺冷却水系统图。

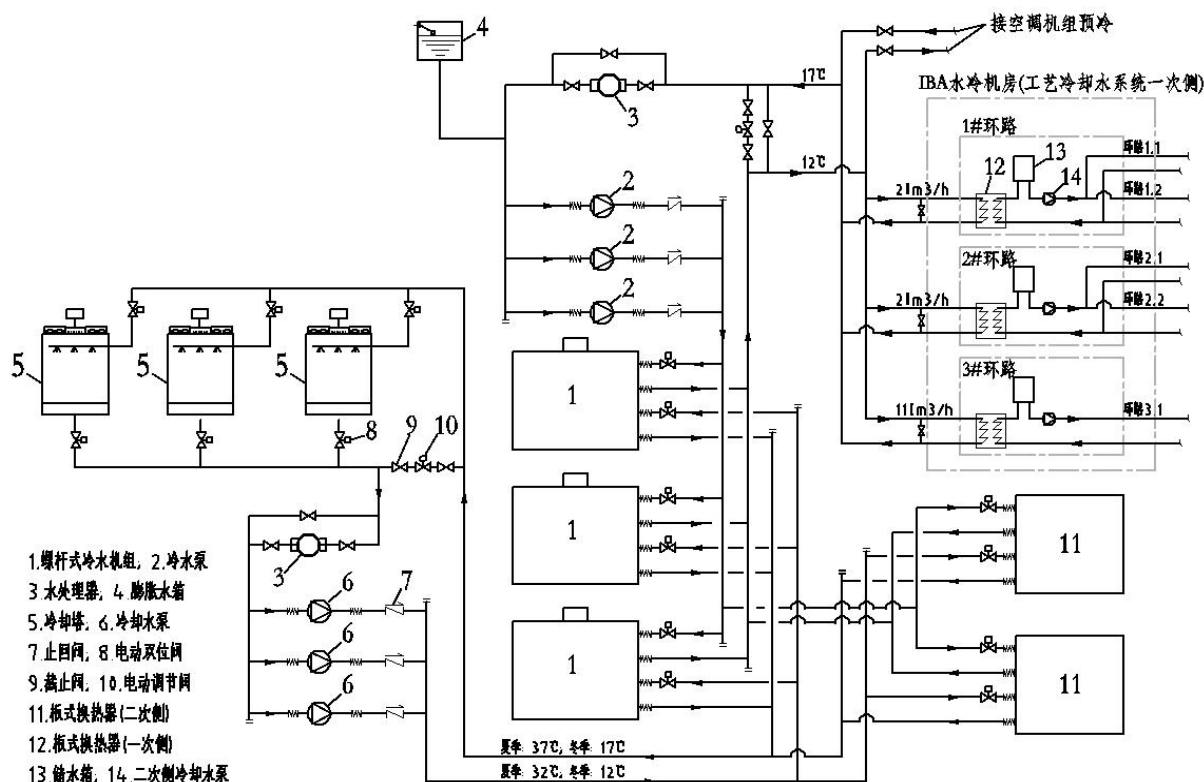


图3 工艺冷却水系统图

Fig.3 Diagram of process cooling water system

按质子设备厂家的要求,一次侧设计院仅进行管道设计,厂家负责提供板式换热机组包含水力模块及控制系统,并负责调试运行。管道穿越或布置在大体积混凝土中时,均按厂家要求设置了备用管道。

二次侧供水温度要求在5~15℃,为提高冷水机组能效并保证系统安全可靠,设计供回水温度定为12/17℃。尽可能利用高温冷水处理冷负荷有利于节能,因此制冷季将高温冷水同时用作空调机组的预冷。高温冷水冷源采用3台变频螺杆式冷水机组、单台额定制冷量为850kW,两用一备轮换运行。二次侧采用一级泵负荷侧变流量系统、主机侧

定流量,利用高位膨胀水箱定压、补水。二次侧设置3台闭式冷却塔,供回水温度为32/37℃,两用一备可同时开启。冬季可关闭冷水机组,利用闭式冷却塔和板式换热器制备二次侧工艺冷却水。冷却塔冗余配置,通过降低冷却塔逼近度来降低冷却水温度、提高冷水机组能效,同时可延长冬季利用闭式冷却塔和板式换热器制冷的时间。

工艺冷却水系统一次侧、二次侧参数需求如表4和表5所示。一次侧1号环路为回旋加速器主线圈和MC供电系统供应冷却水,2号环路为回旋加速器真空系统供应冷却水,3号环路为回旋加速器/ESS/BTS/FBTR/GTR/PSR供应冷却水。

表 4 工艺冷却水一次侧各环路参数需求

Table 4 Requirements for parameters on the primary side of the process cooling water

环路名称	最高回水温度/℃	最大流量/(m³/h)	设备承压/MPa	管径
环路 1.1	50	6	1.8	DN50
环路 1.2	30	1.5	0.6	DN25
环路 2	40	5.5	0.6	DN50
环路 3.1	40	118	0.8	DN200
环路 3.2	40	3	0.8	DN50
环路 3.3	40	15	0.8	DN50
环路 3.4	40	100	0.8	DN150

表 5 工艺冷却水系统二次侧参数需求

Table 5 Requirements for parameters on the second side of the process cooling water

环路名称	供水温度/℃	最大散热量/kW	设备承压/MPa	设备压降/MPa
环路 1	5~15	215	0.4	0.06
环路 2	5~15	165	0.4	0.06
环路 3	5~15	630	0.4	0.1

5 舒适性空调

质子设备用房以外区域的空调为常规设计，采用四管制空调，小房间采用风机盘管加新风系统，大空间采用全空气系统，质子设备厂家办公区的空调有全天使用需求。冷热源采用四管制风冷热泵，空调冷冻水供回水温度 7/12℃，空调热水供回水温度 45/40℃。空调水系统采用一级泵负荷侧变流量系统、主机侧定流量。

6 辐射屏蔽及防护措施

质子回旋加速器大厅、束流传输通道和各治疗室的墙体、顶板均为大体积混凝土一次浇筑成形。机电管道穿越墙体时，需考虑相应的辐射屏蔽和防护措施，以减少对周围环境的辐射剂量^[11-13]。图 4 所示为预埋风管平剖面图。冷媒管套管按水平和垂直方向均倾斜 45°预埋。管道穿墙前后均采用不小于墙壁铅当量的屏蔽措施，以减少对墙体屏蔽效果的破坏^[14]。风管和冷媒管进入机房后沿迷道敷设，以减少感生射线通过管道向外辐射的剂量。

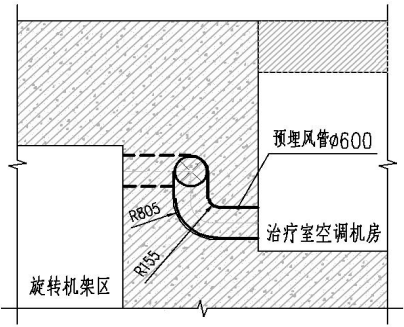
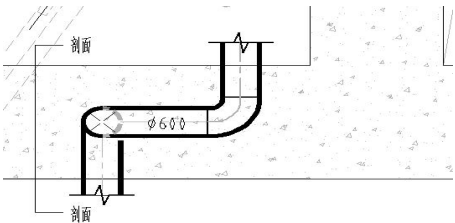


图 4 预埋风管平、剖面图

Fig.4 Plan and section drawings of the embedded ducts

7 节能设计

工艺冷却水系统全年运行，夏季通过降低冷却塔逼近度来降低冷却水温度、提高冷水机组能效；冬季可利用闭式冷却塔和板式换热器制备二次侧工艺冷却水。螺杆式冷水机组在 12℃ 供水工况的 SCOP 明显高于风冷热泵在 7℃ 供水工况的 COP，优先利用高温冷水为空调机组提供预冷。

8 其他

8.1 消防设计

质子设备治疗室建筑面积大于 50m²、经常有人停留且无可开启外窗，设有高压细水雾灭火系统，为避免影响灭火效果不设置机械排烟设施。其他区域防排烟均按规范要求设计^[15,16]。

8.2 BIM 应用

因辐射屏蔽要求,质子设备用房区域存在较多大体积混凝土墙体和楼板,机电专业大量管线穿行

其中,浇筑后没有返工条件,BIM 技术在设计及施工阶段的机电管线综合预埋方面起到了重要作用。图5所示为局部管道预埋透视图。

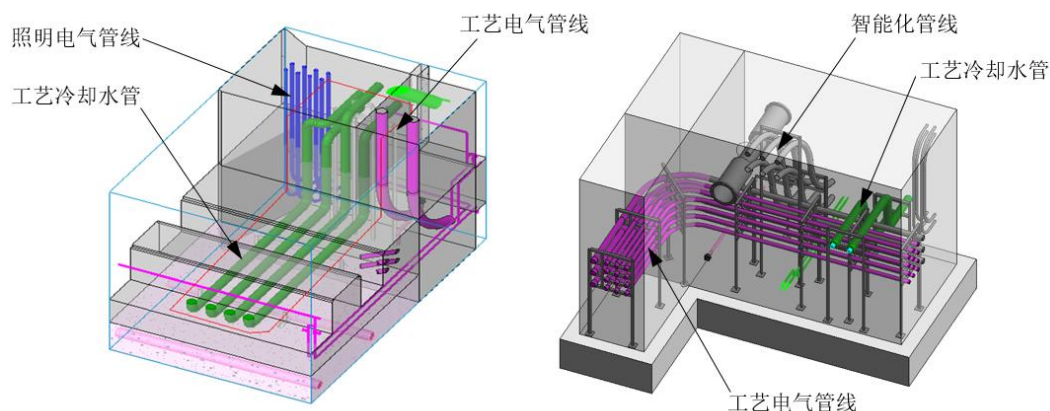


图5 机电管道预埋透视图

Fig.5 Perspective view of the embedded mechanical pipes

9 设计注意事项

质子设备造价昂贵、运行维护费用高,对温湿度敏感,工艺冷却水系统除质子设备检修外需常年连续运行,设备选型应按极端天气的室外气象参数校核,并考虑必要的冗余量和备用。

工艺冷却水系统全年运行,节能措施可以考虑冬季利用冷却塔免费制冷,但前提是不影响医疗工艺。制冷模式的切换过程会导致工艺冷却水系统水温波动,应根据系统水容量校核水温波动是否在可接受范围,必要时可以设置储能水箱。制冷模式切换的时点需要与质子设备运维团队紧密沟通,尽量选择在校修或夜间待机状态时切换。

10 结论

本文重点介绍了质子中心工艺空调通风系统、工艺冷却水系统和设计注意事项等。质子设备厂家稀少,其标准要求严苛,暖通空调设计时必须严格达到其标准要求,设计应以运行安全、稳定可靠为原则兼顾节能。目前本项目已通过竣工验收和质子设备厂家验收,正处于质子设备的安装调试阶段。质子中心设计、建设和运营经验少,发展潜力大,希望本文能够为将来质子中心的暖通设计提供参考。目前尚缺乏质子中心的运行数据和反馈,后续可进行收集和分析研究以完善优化暖通空调设计方案。

参考文献:

- [1] 刘世耀.质子和重离子治疗及其装置[M].北京:科学出版社,2016:162-176.
- [2] 刘蕾,闻彪.上海瑞金医院肿瘤(质子)中心冷热源系统及绿色节能设计[J].机电信息,2016,(22):97-100.
- [3] 高峰,王运平,伍晨.天津某质子治疗中心工艺及舒适性空调冷热源系统设计[J].暖通空调,2019,49(7):92-95.
- [4] 彭亮,尹银涛,王羽珊,等.武汉协和医院质子中心暖通空调设计[J].暖通空调,2022,52(5):85-89.
- [5] 滕汭颖.上海质子重离子医院工艺冷却水及空调水系统节能设计[J].发电与空调,2011,32(3):16-20.
- [6] 李颜.上海质子重离子医院建筑辐射防护设计技术要点[J].绿色建筑,2018,(3):76-78.
- [7] 金潇,严源,韩春彩.高能质子治疗系统辐射环境影响评价关键问题探讨[J].中国辐射卫生,2020,29(1):65-68.
- [8] 方春锋,侯俊,徐寿平,等.质子治疗系统原理及其应用[J].中国医学装备,2021(18):187-192.
- [9] HJ 1198-2021,放射治疗辐射安全与防护要求[S].北京:中国环境出版社,2021.
- [10] GBZ 121-2020,放射治疗放射防护要求[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [11] 邹剑明,许志强,耿继武,等.基于蒙特卡罗方法的质子治疗室屏蔽防护探讨[J].中国辐射卫生,2019,28(4):443-446.

(下转第 590 页)