

# 浅析医用直线加速器机房选址与建设关键要素

余 力

上海申康卫生基建管理有限公司 上海 200080

**摘 要：**医用直线加速器机房建设是多学科系统工程，旨在构建可靠辐射防护屏障，为放疗设备提供稳定运行环境。

**关键词：**辐射安全；选址；建设标准

前言：医用直线加速器是肿瘤放疗核心设备，辐射风险极高。机房建设核心是保障辐射安全、设备稳定及治疗精准，选址、建造、施工需严格把控。本文简述其选址、屏蔽设计、关键系统、施工及质量控制的技术要点与实践，为科学建设提供参考。

## 1 医用直线加速器及其机房的重要性与辐射安全核心挑战

医用直线加速器通过微波加速电子撞击重金属靶产生高能X射线，用于肿瘤治疗。其射线能量高（通常6MV及以上）、穿透力极强，辐射安全是机房建设的首要核心原则。选址和建设不当将带来重大风险，包括辐射泄露致人员损伤、治疗精度下降、设备可靠性降低及运行成本剧增<sup>[1]</sup>。因此，机房建设需构建高性能辐射防护壁垒，严格限制射线于治疗区域，同时为设备运行和治疗流程提供最优环境。

### 2 机房选址

#### 2.1 选址辐射安全方面

地下优先：首层地下室或更深层是最优选择。上层覆土与建筑物自重提供了天然的、成本效益高的垂直方向屏蔽，显著减轻对地板厚度的要求。同时，地下环境受地面交通、人员活动震动干扰小。

地面独立建筑：若地下室不可行或设备型号特殊，可考虑独立建筑。优势在于完全避开人流，屏蔽设计自由度大，震动隔离相对容易。但需评估土地成本、管线接入距离、患者转运便利性。

主楼内选址：机房优先选建筑底层角落或边缘区域，背向人员密集区。垂直方向，正上方须避开人员长期停留区，正下方若非设备层或库房需屏蔽评估，严禁位于人员密集区正上方。水平方向，四壁外侧须远离并背向内部公共区域及治疗科室，对墙外相邻空间及院墙外环境需进行综合评估<sup>[2]</sup>。迷宫通道出口避开主要人流，建议朝向僻静区域或设备通道。

#### 2.2 大型设备物流动线方面

需明确加速器型号的物理尺寸、重量及运输包装尺寸。运输路径需全流程评估：外部路径（医院大门至建筑入口）核查道路宽度、高度限制、转弯半径、坡度及路面承重；内部路径（建筑入口至机房）精确测量门洞、走廊、电梯及楼梯间的尺寸和承重，考虑大型组件旋转倾斜空间；机房入口大门或预留吊装口尺寸确保最大部件通过；垂直运输受限则设计阶段明确永久或临时吊装口位置、结构加固、防水及封堵方案。

#### 2.3 微振动控制基础环境方面

为确保设备稳定运行，需对场地振动环境进行全方位评估：应避开大型内部震源（如中央空调冷却塔、大型水泵站、制冷主机房、空压机房、大型锅炉房、柴油发电机房等）；评估周边交通等外部震源影响，获取其振动数据或进行现场实测；同时需了解场地地质条件对振动传递的影响，必要时进行场地微振动本地测试；在机房选址上，应优先考虑位于刚性基础区域。

#### 2.4 配套设施保障能力方面

电力供应：为确保可靠供电，需精确计算加速器主机、辅助系统（如水冷机、空调、照明、网络等）及扩展所需的总负荷，通常应配置双路独立市电并在末端实现自动切换；同时，必须保障电源质量满足电压稳定、频率稳定及低谐波畸变的要求，应对医院现有电网状况进行合理评估，必要时增设专用隔离变压器及有源滤波器；此外，还需在建设初期预留足够的主电缆通道，确保其能够顺畅连接至上级配电柜。

冷却水系统：设计冷却系统时，首先需精准匹配加速器核心部件（包括磁控管/速调管、加速管、靶、偏转磁铁等）对冷却水的流量、压力、温度及水质的具体要求；为满足这些严苛需求，通常需配置独立的恒温水冷机组，并将其安置于邻近的设备间或屋顶位置，以确保设备的可靠运行<sup>[3]</sup>。

通风空调：设备散热量大，设独立冗余精密空调，维持温度 $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度40-60%；高能射线产生臭氧等有

害气体, 设独立机械排风系统, 排风口位于机房上部, 排风量根据机房体积换气次数及设备发热量校核, 排风口高于邻近建筑屋面, 远离新风入口、门窗及人员活动区, 进风过滤; 机房相对于外部走廊、控制室维持负压 (-5~15Pa), 防止污染物外泄。

网络与弱电: 需预留充足带宽的冗余网络线路, 便于设备控制系统的信息传输, 并规划覆盖全面的监控、对讲、门禁、紧急停机按钮及辐射状态指示灯的线路与接口。

### 3 机房建设

#### 3.1 辐射屏蔽结构系统

##### 3.1.1 屏蔽原理与材料选择

衰减机制: 主要依赖高密度材料通过光电效应、康普顿散射、电子对效应吸收或散射光子能量。屏蔽效能取决于材料密度和厚度。

常用材料: 混凝土、重晶石砖、铅版, 具体防护屏蔽尺寸参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 的相关规定, 根据设备和场地周边具体情况进行核算。

屏蔽与厚度要求: 主屏蔽墙位于机架旋转平面内, 面向射线束最大输出方向 ( $0^{\circ}$ 和 $180^{\circ}$ ), 厚度最大 (2.0-3.5米甚至更高), 防护“有用线束”和“泄露辐射”; 次屏蔽墙面向与射线束轴线垂直方向及顶棚、地板, 主要防护“泄露辐射”和“散射辐射”。地板屏蔽除满足主/次要求外, 地下室顶板需额外增厚以满足上方防护; 顶棚屏蔽需满足上方防护, 机房若在顶层或有屋顶设备平台需评估, 常见隐患为混凝土密度不均或厚度不足。

结构设计要求: 需确保墙体、顶板、地板形成连续密封屏蔽体以满足整体性要求; 结构设计须精确计算荷载, 对地基、基础、梁柱、楼板进行承载力计算与加固, 地下室底板承载力关键, 设计前开展专项结构安全评估; 大体积重混凝土设计采用低水化热水泥、优化配合比、温度钢筋、冷却水管及浇筑养护方案, 以控制水化热裂缝; 预埋铁件须精确定位 (误差  $\leq \pm 2\text{mm}$ ), 并标注位置、尺寸、材质及固定方式。

#### 3.2 防护门系统

##### 3.2.1 结构与材料

复合屏蔽层采用‘钢-铅-钢’结构或整体钢块结构, 门体总铅当量需与邻近墙体等效且  $\geq 10\text{mmPb}$ ; 防护门自重常在5-15吨, 需配置电机驱动系统, 具备缓起缓停、遇阻停止、手动释放功能。

##### 3.2.2 密封技术

防护门的门-框间隙需控制在  $\leq 3\text{mm}$ , 通过台阶式

搭接或斜企口结构增加射线穿行路径; 门框凹槽内填充特制高密度可压缩材料作为可压缩密封条, 底部密封则可采用自动升降式铅挡边或重型柔性铅垂帘结构<sup>[4]</sup>。安全联锁方面, 防护门必须与加速器控制系统实现多重硬接线联锁: 门状态联锁要求只有防护门完全关闭并锁紧到位, 加速器才允许启动; 门运动联锁需确保加速器出束过程中, 任何开门操作立即终止射线输出; 机房内设置醒目的紧急开门按钮, 按下后强制开门并使设备停止; 关键联锁回路还应采用冗余传感器和安全继电器实现故障安全逻辑。

##### 3.2.3 迷宫区域

工作原理: 利用多次散射衰减射线。射线在迷道内壁经多次非直角散射, 能量迅速降低, 到达出口时剂量水平已降至安全限值以下。

设计要点: 迷宫设计常采用‘L型’或‘Z型’拐弯, 其拐弯次数、内壁材料、迷道宽度及长度均需根据加速器能量和入口处剂量率要求计算确定; 入口处应设置次级防护门, 其铅当量可低于主防护门, 但需保证良好密封和联锁功能; 迷宫内壁需额外加强屏蔽, 以承受高剂量散射辐射轰击; 机房内需设置醒目紧急开门按钮, 按下后强制开门并使设备停止; 关键联锁回路应采用冗余传感器和安全继电器实现故障安全逻辑<sup>[5]</sup>。

#### 3.3 设备基础与微振动控制系统

必要性: 直线加速器等中心定位精度要求达到亚毫米级。外部环境振动和内部设备振动都可能通过建筑结构传递至加速器, 导致机械偏差, 严重影响治疗精度。

结构原理: 在机房底层结构上, 铺设高性能隔振器, 再在其上整体浇筑一块厚重的钢筋混凝土板, 加速器最终安装在此浮筑板上。隔振器切断振动能量的传递路径。

关键参数: 固有频率基于隔振器刚度与浮筑板质量计算, 目标是将系统固有频率降至3-6Hz以下, 以远离主要外部干扰频率并实现有效隔振; 隔振效率则需通过振动传递率计算及测试验证。

控制要点: 隔振器选型与布置需根据浮筑板总重精确计算荷载并均匀布置, 同时考虑其刚度、阻尼比、长期稳定性及蠕变特性, 弹簧隔振器还需配置阻尼器, 安装水平度应  $\leq 0.3\text{mm/m}$ ; 浮筑板设计要求板厚  $\geq 400\text{mm}$ 、配筋密集且刚度高, 以保证自身变形并避免过长悬臂<sup>[6]</sup>; 此外, 为实现绝对隔离, 浮筑板需与周围墙体、柱、地面完全脱开, 间隙内填充柔性材料, 所有穿越浮筑板的管线必须采用长度  $> 300\text{mm}$ 的柔性连接, 任何“声桥”均会导致隔振失效; 另外, 浮筑板上表面需

设置高精度水泥砂浆找平层,平整度 $\leq 2\text{mm}/2\text{m}$ ,以为设备安装提供基准面。

### 3.4 环境保障系统

**温度与湿度控制:**独立精密空调系统,确保治疗室内温度恒定( $22^{\circ}\text{C}\pm 1\text{-}2^{\circ}\text{C}$ ),相对湿度( $40\text{-}60\%\pm 5\%$ )。温度波动影响加速器微波频率稳定及机械部件热胀冷缩;湿度波动影响可能引起高压打火、电子元件故障和静电。

**通风与换气:**排风系统应安装大风量低噪音排风机,通过独立防腐蚀且连接处密封良好的风管,将机房内臭氧和热空气排至高出周围最高建筑3米以上的屋顶高空安全区域,确保换气次数满足散热与臭氧稀释要求;新风系统需设置经初效、中效过滤的装置,维持室内正压或所需的负压梯度,新风量应满足人员最小呼吸需求和补偿排风量;水冷系统则为加速器核心部件提供 $24^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 的恒温冷却水,系统包含冷水机组、循环水泵、膨胀水箱、维持电导率 $< 1\mu\text{S}/\text{cm}$ 的去离子水装置、过滤 $\geq 5\mu\text{m}$ 颗粒的精密过滤器、流量计、温度/压力传感器及自动补水阀,要求管道保温防结露,并具备冗余和自动保护功能。

### 3.5 电气系统

**配电:**放射专用变压器、主配电柜、设备分配电柜。供电回路严格分离。设备线缆需采用大截面阻燃电缆。

**防雷与接地:**防雷系统需设置包含接闪器、引下线、接地装置的独立完善雷电防护系统,并在电源线路安装多级SPD。接地系统采用独立接地或共用接地体的专用接地干线,设置设备保护接地、等电位联结和功能性地接地,确保接地电阻 $\leq 1\Omega$ ,且在浮筑地板内设置均压等电位网格。

**弱电与智能化:**监控系统配高清摄像机,覆盖机房治疗区、设备区、迷宫通道、防护门外及控制室,确保无死角、图像清晰连贯且带音频采集;对讲系统在控制室与机房内、关键位置设双向对讲装置,保障沟通顺畅;门禁系统控制防护门及迷宫入口门,记录人员进出信息;紧急停机装置在醒目位置设急停按钮,按下即切断加速器高压并解锁防护门;辐射状态指示灯在机房主门及迷宫入口上方设大型红色警示灯,与加速器状态连锁;环境参数监控实时监测显示温度、湿度、压力差及冷却水温度/压力/流量;网络用光纤连接控制室、工作站及医院网络,满足数据通讯与影像传输需求<sup>[7]</sup>。

## 4 过程质量控制、检测与验收要点

### 4.1 全过程质量监控

**材料进场检验与工序验收要求:**钢筋、混凝土、铅版(或晶体砖)、防护门组件、隔振器、电缆、密封材

料等主要材料,必须提供合格证、检验报告,并按规定抽样复检;工序验收需严格执行隐蔽工程验收制度,加强大体积混凝土浇筑、防护门安装调试、浮筑板调平、连锁测试等关键节点的现场监督。

### 4.2 关键性能检测

#### 4.2.1 辐射防护检测验收

检测单位应具备相关检测资质并编制《放射性职业病危害控制效果评价报告书》;检测需在加速器安装调试完成后,于最大能量、最大剂量率条件下进行,检测点需覆盖所有防护门四周缝隙、迷宫出口、屏蔽墙外侧、穿墙管线封堵处、通风口等潜在泄漏点,且检测结果必须满足国家强制标准规定的剂量限值要求。

#### 4.2.2 浮筑地板隔振性能测试

使用振动分析仪,在浮筑板基础和浮筑板上表面分别布置传感器测量振动信号,计算振动传递率或插入损失以验证是否达到设计要求;模拟所有可能场景对防护门连锁功能进行测试,确保连锁动作100%可靠、无延时;试运行期间测试温度、湿度、冷却水参数,验证是否满足设计标准;由设备厂商或专业工程师验证加速器等中心精度、激光灯定位精度、光野与射野重合度等关键机械和几何精度。

## 结论

医用直线加速器机房建设是融合多学科的高度复杂系统工程,核心是打造绝对可靠的辐射屏障和稳定精密的设备运行环境。选址时首要辐射安全,地下室或独立为首选,避人防振,规划大型设备运输通道及医护患者高效动线。建设时做好科学屏蔽、精密防振基础及保障设备稳定运行的恒温恒湿环境。实施中须结合现场审慎选案,统筹投资效益,确保项目高质量建成并安全运营。

## 参考文献

- [1]GBZ 121-2020《放射治疗辐射防护与安全要求》
- [2]AAPM TG-148:放疗机房屏蔽设计指南
- [3]《电子加速器放射治疗放射防护要求规定》(GBZ126-2011)
- [4]医院基建项目管理案例集(中国建筑工业出版社,2023)
- [5]国家卫生健康委员会.GB 18871-2002电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S].2002.2.
- [6]中国疾病预防控制中心.GBZ130-2020医用X射线诊断放射防护要求[S].2020.
- [7]陈美武,黄春升,阮伟其,等.医院有限空间内地下室改造为放疗设备机房项目全流程管理[J].中国医院建筑与装备,2024,25(08):66-71.