

数字化赋能医疗直线加速器机房施工管理

文 / 巨军昌 深圳市建安东部建设有限公司

摘要：本文笔者以北京大学深圳医院深汕医院直线加速器机房项目为研究对象，主要就数字化技术（BIM+VR+数字化测温）的赋能路径进行了一些分析和探讨，重点融入VR交互与VR交底技术，通过“虚拟预演-沉浸式交底-实时协同”模式，解决多专业协同、大体积混凝土温控、防辐射预埋及设备吊装等难点。以期可以为医疗专项工程施工管理提供“可视化、交互式、精细化”新范式。

关键词：数字化技术；医疗直线加速器机房；BIM技术；VR交互；VR交底；防辐射施工

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.032

引言

医疗直线加速器机房作为肿瘤放疗核心设施，其施工具有防辐射标准高、精度要求严苛、多专业交叉复杂及设备运输风险大等特点。在施工过程中，需满足防辐射屏蔽（墙体厚度达1700mm）、设备安装精度（预埋偏差 $\leq 5\text{mm}$ ）及多专业协同（4大专业交叉作业）三大核心要求。

一、工程概况

北京大学深圳医院深汕医院项目（以下简称“深汕医院”）的规模是三级甲等，床位800张，总建面15.8万 m^2 。其直线加速器机房位于负二层，施工涉及3900 m^3 大体积混凝土（顶板1500 m^3 ）、128处防辐射预埋管线（ $\phi 50$ 不锈钢管/ ϕ 无缝钢管）及超10t设备吊装。项目创新性引入“BIM+VR”技术，通过VR交互实现多专业虚拟协同，借助VR交底解决施工要点传递难题，为同类项目提供实践参考。

二、数字化施工管理核心技术理论

（一）BIM技术：数字化建模与协同基础

建筑信息模型（BIM）以三维模型为载体，整合几何信息（如底板标高-10.000m、墙体范围-9.7m至-2.15m）、物理信息（混凝土标号C35、管线材质）与管理信息（施工进度、验收标准），具备可视化、参数化特性。在机房施工中，BIM模型是VR场景的“数据源”，需完成三大核心工作：一是多专业模型整合（土建+机电+医疗专项）；二是碰撞检测（如管线与暗柱冲突）；三是施工工序参数

化（如混凝土浇筑顺序），为VR技术应用奠定基础。

（二）VR技术：沉浸式交互与交底核心

虚拟现实（VR）技术通过头显设备（如Pico 4）构建1:1虚拟机房场景，具备沉浸式体验（还原机房细节，如预埋管线走向）、实时交互（虚拟操作/标注）、多端协同（多用户同步进入场景）三大优势，其核心价值体现在两点：

VR交互：将BIM模型转换为可操作的虚拟环境，支持多专业人员“进入”机房，直观查看结构与管线关系（如-8.6m标高处管线与吊顶间距），实时标注冲突点（如管线与钢筋重叠），解决传统会议“纸上谈兵”问题；

VR交底：将施工要点（如灌沙法固定管线、冷却管安装）转化为虚拟操作流程，工人通过VR头显“模拟施工”，理解精度远高于口头交底（传统交底理解偏差率30% vs VR交底5%）。

（三）数字化测温技术：大体积混凝土温控保障

依托JDC-2型电子测温仪与云端平台，实时采集混凝土内部（78 $^{\circ}\text{C}$ 峰值）与表面温度数据，每小时上传1次，通过温度曲线分析温差，为VR预演中的温控方案调整提供数据支撑。

三、深汕医院直线加速器机房施工难点与数字化需求

（一）项目概况

深汕医院直线加速器机房位于负二层放疗科，核心参数如下：

施工部位	尺寸 / 参数	技术要求
底板结构	标高 -10.000m, C35 混凝土	浇筑密实, 无裂缝
墙体结构	-9.7m 至 -2.15m, 厚度 1700mm	内外温差 $\leq 25^{\circ}\text{C}$, 垂直度偏差 $\leq 3\text{mm}$
防辐射预埋	“之”字弯管线, $\phi 50$ / 无缝钢管	定位偏差 $\leq 5\text{mm}$, 无变形
设备运输	直线加速器 (长 6m/ 重 10t)	运输净高 $\geq 4.5\text{m}$, 坡道坡度 $\leq 15^{\circ}$

（二）核心施工难点与数字化需求

传统二维图纸无法呈现“土建钢筋-机电管线-医疗设备”的空间关系，多专业会议中工程师需反复解释，仍易遗漏冲突（如-8.6m标高处管线与暗柱重叠）。需求：

通过VR交互构建虚拟机房，各专业人员“沉浸式”查看协同关系，实时标注优化。

防辐射预埋（“之”字弯角度 135° ）、混凝土浇筑（分层厚度500mm）等要点，传统口头+图纸交底后，工人

理解正确率仅 70%，易出现管线变形、浇筑漏振。需求：通过 VR 交底模拟操作流程，工人“亲手”演练预埋与浇筑，强化记忆。

直线加速器从工地大门→地下室坡道→负二层机房，路线涉及坡道转弯（原半径 6m，不足设备运输要求 8m）、吊装口承重（需≥ 15t），传统踏勘无法模拟设备动态运输过程。需求：通过 VR 预演运输路线，提前优化坡道与吊装口参数。

顶板 1700mm 厚混凝土水化热峰值达 78℃，传统人工测温滞后（每 4 小时 1 次），无法实时调整温控措施。需求：将数字化测温数据接入 VR 场景，直观展示温度分布，动态优化冷却管方案。

四、数字化技术（BIM+VR）的实践应用

（一）多专业协同管理：BIM 整合 +VR 交互会议

深汕医院通过“BIM 建模-VR 场景转换-虚拟协同”流程，解决多专业冲突问题，具体实施步骤如下：

各专业分别搭建模型：土建模型标注底板/墙体/顶板的结构尺寸（如导墙高 300mm）、机电模型明确预埋管线规格（ $\phi 50$ 不锈钢管壁厚 3mm，洞口标高 H=4.300m）、医疗专项模型标注“之”字弯位置与角度。通过 Autodesk Revit 将模型整合，形成完整机房 BIM 模型，精度达毫米级。

将 BIM 模型导入 VR 平台（如 Autodesk Navisworks+HTC Vive），生成 1:1 虚拟机房场景：工程师佩戴 VR 头显进入场景后，可“行走”查看各部位细节（如 -9.7m 至 -8.6m 墙体的钢筋排布），通过手柄标注冲突点——共发现 3 类问题：①机电管线与暗柱钢筋重叠（-8.6m 标高）；②精装吊顶龙骨与管线间距仅 50mm（规范≥ 100mm）；③吊装口与设备入口偏差 150mm。

针对问题，各专业人员在 VR 场景中实时讨论：将管线偏移 100mm 避开暗柱、吊顶标高降低 100mm 增大间距、吊装口位置调整至设备入口正上方，优化方案即时更新至 BIM 模型，避免后期返工。

相较于传统纸质会议（平均时长 2 小时，冲突发现率 60%），VR 交互会议时长缩短至 1 小时，冲突发现率提升至 100%，多专业协同效率提升 50%。

（二）防辐射预留预埋管理：BIM 深化 +VR 沉浸式交底

防辐射预埋是机房施工核心（管线偏差≤ 5mm，否则引发射线泄露），项目通过“BIM 深化 +VR 交底”确保精度，具体路径如下：

BIM 预埋图纸深化

基于设计图纸，利用 BIM 软件细化“之”字弯管线参数：弯曲角度 135°、直线段长度 300mm、与墙体距离 200mm，明确灌沙法固定的支架间距（500mm）与填充标准（沙子密实度≥ 90%），形成深化图纸后经院方与设备厂家确认。

VR 交底模拟操作流程主要是将 BIM 深化模型导入 VR

平台，制作“防辐射预埋 VR 交底课件”，涵盖 3 个核心环节：

虚拟巡检：工人佩戴 VR 头显进入虚拟机房，直观查看预埋管线的空间位置（如水冷机房洞口标高 H=1.900m），点击管线即可显示参数（材质、壁厚、偏差允许值）；

模拟操作：工人通过 VR 手柄“模拟”预埋施工：先固定支架→放置管线→灌沙填充→检查密封性，若操作错误（如支架间距 700mm），系统即时提示并讲解规范要求；

问题复现：模拟混凝土浇筑时管线受力场景，展示“未灌沙管线变形”的后果（偏差 12mm，超标），强化工人对灌沙法重要性的认知。

现场实施与复核主要是 VR 交底后，工人按虚拟流程施工，同步使用三维激光扫描仪复核预埋位置，偏差超 5mm 的 3 处管线（最大 8mm）均通过调整支架修正，最终预埋合格率达 97.7%，远高于传统施工的 85%。

（三）大体积混凝土施工管理：BIM 温控 +VR 可视化监测

机房 3900m³ 大体积混凝土（顶板 1500m³）需严格控制裂缝，项目通过“BIM 温控模型 +VR 温度可视化”实现闭环管理：

在 BIM 模型中优化冷却循环管布置：间距从 800mm 调整为 600mm，减少管材 48m；测温元件按 50 m² / 个布置（共 28 个），标注每个元件的深度（如底板中心 -10.000m，表面 -9.700m），模型同步关联数字化测温系统。

将数字化测温数据（每小时 1 次）实时接入 VR 场景：在虚拟机房中，混凝土表面与内部温度以不同颜色显示（红色≥ 70℃，蓝色≤ 30℃），工程师佩戴 VR 头显可“穿透”墙体查看温度梯度——当 -9.7m 至 -8.6m 墙体出现 32℃ 温差（超规范 25℃）时，VR 场景即时报警，现场团队通过调整冷却管流量（从 1.5m³/h 升至 2.0m³/h）、覆盖保温棉，24 小时后温差降至 22℃。

针对超大截面墙柱（2400mm×1200mm），利用 VR 交底模拟模板安装：工人在虚拟中查看“双层酚醛树脂覆膜胶合板+中间夹塑料薄膜”的结构，理解根部对撑（间距 500mm）的受力原理，避免模板变形。最终混凝土浇筑后，墙柱垂直度偏差≤ 3mm，表面平整度≤ 2mm，无裂缝产生。

（四）设备运输与吊装管理：BIM 模拟 +VR 预演

直线加速器设备（长 6m/重 10t）运输风险高，项目通过“BIM 路径优化 +VR 预演演练”确保安全：

BIM 运输路线建模：构建包含工地大门、地下室坡道、吊装口、机房入口的 BIM 模型，标注关键参数：坡道净高 4.2m（不足 4.5m）、转角半径 6m（不足 8m）、吊装口承重 12t（不足 15t）。通过 BIM 软件优化路线：坡道局部抬高 300mm（净高 4.5m）、转角拓宽 2m（半径 8m）、吊装口加固（承重 15t）。见图 1。

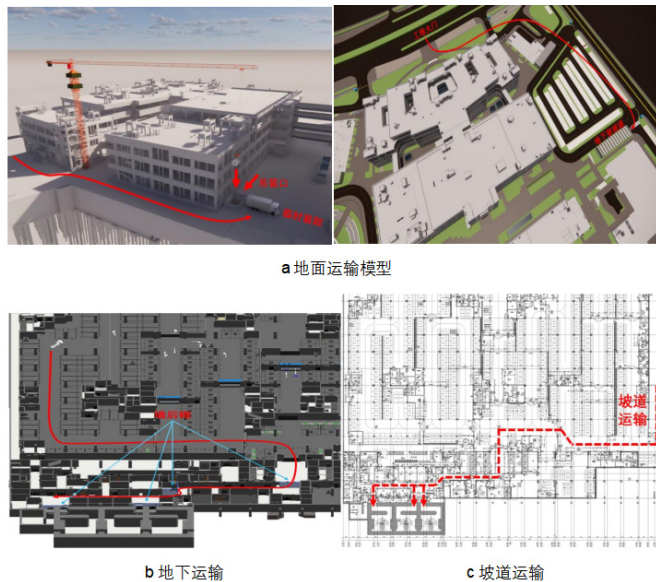


图1 深汕医院直线加速器设备运输路径BIM模拟图

VR运输与吊装预演：将优化后的BIM模型导入VR平台，制作“设备运输VR预演课件”，组织司机、吊装工、安全员参与；

路线预演：司机佩戴VR头显模拟驾驶运输车辆，体验坡道转弯角度（15°）、净高限制（4.5m），熟悉避障要点；

吊表演练：吊装工通过VR手柄模拟设备起吊（从地面至吊装口）、下放（从吊装口至负二层），掌握吊装速度（0.5m/min）与角度（垂直下放）；

应急模拟：设置“坡道刹车失灵”“吊装绳偏移”等应急场景，训练人员处置流程，提升风险应对能力。

实际实施成效：VR预演后，设备运输与吊装仅用3小时（原计划8小时），未发生碰撞或结构损伤，效率提升62.5%，远超传统“现场试吊”模式。

五、数字化赋能施工管理的成效分析

（一）施工精度与质量显著提升

防辐射预埋：VR交底后合格率从85%升至97.7%，管线偏差均≤5mm，无射线泄露风险；大体积混凝土：数字化温控+VR监测实现裂缝控制合格率100%，墙柱垂直度偏差≤3mm；设备安装：VR预演确保运输与吊装零碰撞，设备定位偏差≤3mm，满足医疗设备安装要求。

（二）施工效率与成本优化

工期缩短：多专业协同效率提升50%，VR交底时间缩短40%，机房施工总工期从180天缩至150天（缩短16.7%）；

成本降低：BIM+VR提前发现冲突，避免返工成本20万元；冷却管优化减少管材48m，材料成本降低8%；整体施工成本降低12%。

（三）管理协同与风险管控升级

协同效率：VR交互会议替代传统纸质会议，沟通大幅减少，信息传递效率提升50%；

风险预警：VR预演+数字化监测实现风险预警准确率95%，未发生安全事故；

人员培训：VR交底使工人施工要点理解正确率从70%升至95%，新手培训周期缩短50%。

六、结论与展望

（一）研究结论

本文通过深汕医院直线加速器机房项目实践，验证了“BIM+VR”数字化技术的核心价值：VR交互解决多专业协同“看不见、说不清”的问题，冲突发现率提升至100%；VR交底突破传统交底的认知壁垒，工人理解正确率大幅提升，减少了人为失误；BIM与VR协同实现“虚拟预演-实体施工”闭环，施工精度、效率与质量同步提升，为医疗专项工程提供可复制模式。

（二）未来展望

VR+AI智能交底：结合AI技术实现个性化交底，根据工人技能水平推送VR课件（如新手侧重基础操作，老手侧重风险点）；VR+物联网实时联动：将施工现场的物联网数据（如混凝土坍落度、设备位置）接入VR场景，实现“虚拟监测-实体控制”实时联动。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑信息模型应用统一标准(GB/T 51210-2016) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [2] 中国建筑科学研究院. 大体积混凝土施工规范(GB 50496-2018) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [3] 王健, 李娜. 虚拟现实(VR)技术在建筑工程施工交底中的应用[J]. 施工技术, 2022, 51(12): 132-135.
- [4] 住房和城乡建设部科技与产业化发展中心. 建筑工程虚拟现实(VR)技术应用标准(T/CCIAT 0024-2021) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

作者简介：巨军昌（1978年-），男，大学本科，高级工程师。研究方向：建筑管理、建筑设计、施工管理、成本控制。