

圆弧形结构建筑测量施工工程技术

侯渊博 王培齐 王 磊 许康康 吴 豪
中建八局西北建设有限公司 陕西 榆林 719000

摘 要：建筑结构测量施工是建筑工程施工的第一道工序，测量施工的质量关系到建筑工程的施工质量，直接影响建筑物平面位置、尺寸、标高等是否符合设计图纸要求，必须重视建筑结构测量施工。在建筑工程施工中，一般建筑物形状大多为方形，比较简单。近些年来，出现许多圆弧形结构建筑，故对圆弧形结构建筑测量施工工程技术进行了研究。

关键词：圆弧形结构；建筑测量；施工工程技术

圆弧形结构建筑的测量施工需综合应用现代测绘技术与传统方法，重点解决曲线定位、精度控制及结构适配问题。

1 圆弧形建筑测量难点

1.1 多圆心多半径圆弧建筑测设方法。针对多圆心多半径圆弧建筑的测设，需采用分层控制、差异化解算及动态复核的技术策略，控制网分级布设与圆心定位，多级控制网架构，一级网：依据测绘基准点建立全场区闭合导线，测角中误差 $\leq \pm 5''$ ，边长相对中误差 $\leq 1/40,000$ ，作为整体基准。二级网：针对不同圆心分区加密，每个圆弧单元独立设置控制子网，采用全站仪精准投测各圆心坐标，点位误差 $\leq 3\text{mm}$ 。三级网：用于细部结构（如柱位、曲梁节点），在二级网基础上加密放射轴线交点。圆心动态标定，通过CAD坐标转换关联施工坐标系，对超出场区的远距离圆心（如半径 $> 2,000\text{m}$ ），采用全站仪距离追踪技术间接定位。圆心处预埋强制对中装置，定期复核位移，防止施工扰动导致基准失效。差异化解算与曲线放样，分类型测量策略，小半径圆弧（ $R \leq 500\text{m}$ ）：采用弦线等分起拱法，弦上等分点垂直量取矢高定位弧线点。大半径圆弧（ $R > 500\text{m}$ ）：直接使用全站仪极坐标法放样，配合CAD预设加密点坐标（间距 $\leq 20\text{cm}$ ）。无规则曲线：通过三点法或抛物线方程计算特征点坐标，全站仪逐点施测。轴线交会精度控制，多圆心放射轴线与环向轴线交点采用“侧向借线法”，预先验算交角几何关系，放样时双向校核。复杂节点（如双曲线交接处）使用激光扫描仪生成点云模型，比对设计偏差并修正模板定位。误差控制与验证，分级闭合校验，每级控制网独立平差，相邻圆弧衔接处设置公共校验点，平面闭合差 $\leq \pm 3\text{mm}$ 。索结构预应力张拉前后，进行三级内力检测（20%→80%→100%）及1.2倍配重变形监测。动态复测

机制，钢结构吊装阶段全程跟踪复测，沉降观测点布设密度提高至常规工程的1.5倍。幕墙单元安装前执行墨线弹射复核，弧线校验点加密至间距20cm，钢尺施画比对设计弧线。关键点：多圆心结构需重点协调放射轴线与环向轴线的拓扑关系，采用“分圆心独立控制+交会点强化校验”模式，避免误差跨单元传递。现代技术以全站仪极坐标法为主，传统方法（如偏角法）适用于局部遮挡区域。

1.2 高精度轴线点位测设技术。控制基准建立，分级控制网架构，一级控制网：基于国家基准点建立场区整体控制，采用GPS网或测边网，边长相对误差 $\leq 1/150,000$ ，测角中误差 $\leq \pm 5''$ ，满足轴线起算基准需求。二级加密网：针对轴线交点布设，全站仪极坐标法放样，点位平面误差 $\leq 3\text{mm}$ ，高程采用二等水准闭合环控制。三级细部网：服务于柱位、曲梁节点等关键点，在二级网基础上加密，间距根据结构复杂度设定。轴线基准标定，直线结构采用“正交法”：纵轴线与线路中线重合，横轴线通过90°角测设；曲线结构采用“偏角法”：纵轴线位于偏角分角线（ $\alpha/2$ ），横轴线由纵轴线转90°确定；圆心或远距基准点预埋强制对中装置，定期激光铅垂仪复核位移。点位测设核心方法，仪器组合定位，极坐标法：全站仪直接输入设计坐标放样，适用于通视良好区域，角度观测 ≥ 2 测回，距离往返测 $\leq \pm 3\text{mm}$ ；归化放样法：先粗放点位，再精密测量实际坐标，计算偏差后调整至设计位置，精度可达 $\pm 1\text{mm}$ ；错角模式处理：当轴线与坐标系不平行时，通过CAD三点UCS命令重建施工坐标系，转换为平行模式后放样。大跨度轴线控制，跨距 $> 100\text{m}$ 时，控制（D为距离），500m跨距时需将误差压缩至 $\leq 29\text{mm}$ ；基坑两侧同步投测轴线，投点间距加密至 $< 10\text{m}$ ，采用激光扫平仪辅助弹线。精度强化措施，误差动态控制，轴线闭合差 $\leq$

$L/5,000$ (L 为跨度), 钢结构安装全程复测, 节间拼装偏差 $\leq \pm 2\text{mm}$; 高层建筑采用“内控法”: 激光铅直仪通过预留孔逐层投测, 层内垂直度偏差 $\leq 3\text{mm}$, 全楼累计 $\leq 5\text{mm}$ 。验证与纠偏, 护桩体系设置: 纵横轴线方向各钉设 ≥ 3 个永久桩, 桩距 $\geq 2\text{m}$, 混凝土加固防位移; 双人独立放样互核: 关键点位由两组人员分别测设, 坐标较差 $> 2\text{mm}$ 时启动复核流程; 沉降同步监测: 布设1.5倍常规密度的沉降点, 结合倾角螺旋法跨河监测变形。技术迭代方向: 超高层或复杂曲面优先采用BIM模型驱动全站仪自动放样, 激光扫描点云辅助曲面校验, 实现“测设-复核-修正”闭环。

1.3 环向全曲线轴线测设技巧。在环向全曲线轴线测设中, 需综合运用精密仪器定位、动态闭合控制与误差抑制技术, 控制基准优化, 强制闭合控制网, 建立“环向+放射”双控基准: 以圆心为原点布设环形闭合导线 (测角中误差 $\leq \pm 5''$), 同步设置放射状轴线控制桩 (间距 $\leq 20\text{m}$)。圆心预埋强制对中装置 (如不锈钢标芯), 每日温差 $> 10^\circ\text{C}$ 时复测位移, 偏移 $> 2\text{mm}$ 时启动纠偏。曲线坐标系转换, 当轴线与施工坐标系不平行时, 利用三点法重建UCS坐标系 (如AutoCAD的UCS命令), 将曲线方程转换为平行坐标模式后再放样。测设关键技术, 极坐标法精细放样, 全站仪直接输入加密点设计坐标 (弧线点距 $\leq 20\text{cm}$), 角度观测 ≥ 2 测回, 距离往返测互差 $\leq \pm 3\text{mm}$ 。大半径曲线 ($R > 500\text{m}$) 采用“弦线约束法”: 沿曲线等分弦线测设支距点, 以弦长控制弧线走向。动态闭合校核, 分段闭合: 将环线分为4~6段独立测设, 段间设重叠校验区 (≥ 3 个公共点), 平面闭合差 $\leq L/5,000$ (L 为分段弧长)。投测验证: 高层环线采用双激光铅垂仪同步投测圆心, 层间弧线用全站仪复核弦长偏差 (允许 $\pm 3\text{mm}$)。

2 圆弧形建筑测量技术要点

2.1 圆心定位与基准控制。多级控制网布设, 一级网: 基于国家基准点建立全场闭合导线, 测角中误差 $\leq \pm 5''$, 边长相对误差 $\leq 1/40,000$, 作为整体基准。二级网: 分区加密圆心控制点, 预埋强制对中装置, 定期激光铅垂仪复核位移, 偏移 $> 2\text{mm}$ 时纠偏。远距离圆心 (半径 $> 2,000\text{m}$): 采用全站仪距离追踪技术间接定位, 通过CAD坐标转换关联施工坐标系。轴线基准标定, 放射轴线通过圆心布设, 环向轴线形成闭合导线, 两者交点为柱位控制点。圆心处设置不锈钢标芯, 温差 $> 10^\circ\text{C}$ 时复测位移, 防止施工扰动。

2.2 曲线放样关键技术。分半径放样策略, 小半径圆弧 ($R \leq 500\text{m}$): 采用弦线等分起拱法, 弦上等分

点垂直量取矢高定位, 大半径圆弧 ($R > 500\text{m}$): 全站仪极坐标法直接放样, 配合CAD预设加密点坐标 (间距 $\leq 20\text{cm}$)。不规则曲线: 三点法或抛物线方程计算特征点, 逐点施测。动态闭合校验, 环向轴线分4~6段独立测设, 段间设重叠校验点 (≥ 3 个), 平面闭合差 $\leq L/5,000$ (L 为分段弧长)。高层弧线采用双激光铅垂仪投测圆心, 全站仪复核弦长偏差 (允许 $\pm 3\text{mm}$)。护桩体系: 纵横轴线方向各设 ≥ 3 个永久桩, 桩距 $\geq 2\text{m}$, 混凝土加固防位移。双人互核: 关键点位两组人员独立放样, 坐标较差 $> 2\text{mm}$ 时启动复核。

3 提高圆弧形建筑测量精度的方法

3.1 基准控制强化。圆心稳定性保障, 预埋不锈钢强制对中装置, 每日温差 $> 10^\circ\text{C}$ 时复测圆心位移, 偏移 $> 2\text{mm}$ 立即纠偏。大半径圆心 ($R > 2,000\text{m}$) 采用全站仪距离追踪间接定位, 通过CAD坐标转换关联施工坐标系。多级控制网架构, 一级网: 全场闭合导线控制, 测角中误差 $\leq \pm 5''$, 边长相对误差 $\leq 1/40,000$; 二级网: 放射状轴线加密控制点 (间距 $\leq 20\text{m}$), 闭合环形导线同步约束。闭合校验机制, 环线分4~6段独立测设, 段间重叠3个公共点, 平面闭合差 $\leq L/5,000$ (L 为分段弧长); 高层弧线双激光铅垂仪同步投测圆心, 全站仪复核弦长偏差 (允许 $\pm 3\text{mm}$)。

3.2 误差抑制措施。仪器操作规范, 强制对中基座+光学对点器二次复核, 对中误差 $\leq 1\text{mm}$; 全站仪测距精度需满足: 半径 $> 200\text{m}$ 时 $\leq \pm(1\text{mm}+1\text{ppm})$, 搭配360°棱镜消除盲区。环境干扰应对, 风力 > 4 级加设挡风屏, 温差 $> 10^\circ\text{C}$ 暂停作业, 数据波动 $\leq 2\text{mm}$; 钢结构分三级张拉 (20%→60%→100%), 每级持荷10分钟测回弹变形后纠偏。数据闭环校验, BIM模型预演放样路径, 现场实测数据反向输入模型校验偏差; 关键点位双人独立放样互核, 坐标较差 $> 2\text{mm}$ 启动复核流程。

3.3 特殊场景解决方案。通视障碍区: 方位角交合法解算圆弧方程定位, 柔性结构: 激光扫描点云实时校验曲面变形, 动态调整锁定位置。技术迭代方向: 超短圆弧 (角度 $< 225^\circ$) 采用密集扫描点云拟合 (≥ 1000 点), 降低形状误差影响。

4 平面控制网测设基本原则

4.1 整体优先原则。层级控制, 遵循“从整体到局部, 先控制后碎部”的布设逻辑, 先建立全场高精度控制网, 再加密局部网点。国家控制网按“分级布设、逐级控制”实施 (二、三、四等及一、二级)。坐标系统统一性, 控制网坐标系应与工程设计坐标系一致, 避免投影变形 (长度变形值 $\leq 2.5\text{cm/km}$)。施工坐标系需通

过坐标转换关联国家或地方基准。

4.2 精度与密度适配原则。精度分级，等级划分依据工程规模及精度需求：卫星定位测量用于二、三、四等网；导线测量用于三、四等及一、二、三级网。首级控制网精度要求：三等网测角中误差 $\leq \pm 1.8''$ ，边长相对误差 $\leq 1/150,000$ 。密度控制，控制点密度需满足施工需求，避免测量盲区。二级控制点间距：道路工程直线段30~50m，曲线段20~30m；房建主体阶段40~60m，装修阶段加密至20~30m。

4.3 布设实施准则。点位选择，选在通视良好、安全稳固处，避开施工干扰区，并设永久防护（如混凝土桩、不锈钢标芯）。高层建筑需预埋强制对中装置，定期复测位移（温差 $> 10^{\circ}\text{C}$ 时每日校核）。网形优化，首级网宜布设成闭合环形（如附和导线），增强检核条件。加密网可采用插网或线形锁，三角形内角宜 $\geq 30^{\circ}$ ，困难情况下 $\geq 25^{\circ}$ 。误差抑制，环境控制：风力 > 4 级设挡风屏，温差 $> 10^{\circ}\text{C}$ 暂停作业。操作规范：使用强制对中基座，对中误差 $\leq 1\text{mm}$ ；关键点双人独立测量互核。

4.4 动态维护要求。复测机制：土方阶段每15天复测一次，结构阶段每月复测，控制点位移超限（平面 $> 3\text{mm}$ ，高程 $> 2\text{mm}$ ）时重新平差。数据闭环：现场实测数据反向输入BIM模型校验偏差。

5 圆弧形建筑施工技术应用

5.1 空间定位与放线技术。圆心控制与基准传递，预埋强制对中装置定位圆心，温差 $> 10^{\circ}\text{C}$ 时复测位移（偏移 $> 2\text{mm}$ 需纠偏）；大半径圆心（ $R > 2,000\text{m}$ ）采用全站仪距离追踪间接定位，关联施工坐标系。放射轴线与环向轴线形成闭合导线，交点为柱位控制点，圆心处设不锈钢标芯防扰动。

5.2 模板与结构施工。模板体系定制，骨架搭建：方钢管弯折成弧形主背楞，焊接定型模具支撑曲面；穹顶采用钢管扣件式满堂架支撑。曲面铺设：18mm木胶合板按设计弧度切割，拼缝处填塞腻子保证密合度；预制模板拼装双层曲面时需激光扫描点云校验。钢筋与混凝土工艺，钢筋绑扎前按弧度预加工，弧度变化处地面成型后吊装；混凝土浇筑采用分层振捣，每层厚度 $\leq 30\text{cm}$ ，避免冷缝产生。特殊结构处理，悬挑看台：分三级张拉（20%→60%→100%），每级持荷10分钟测回弹变形后纠偏；弧形管道：采用联合管架固定，减少连接配件提升密封性。

5.3 精度控制与质量保障。误差抑制措施，环境控制：风力 > 4 级设挡风屏，温差 $> 10^{\circ}\text{C}$ 暂停作业；操作规范：强制对中基座配合光学对点器（对中误差 $\leq 1\text{mm}$ ），关键点双人独立放样互核。闭环校验机制，环向轴线分4~6段测设，段间重叠3个公共点，平面闭合差 $\leq L/5,000$ （L为弧长）；BIM模型预演放样路径，实测数据反向输入模型动态纠偏。

5.4 安全与环境管理。高空防护：临边设1.2m高防护栏，作业人员配五点式安全带锚固生命线；绿色施工：模板切割粉尘区域设除尘设备，废弃腻子分类回收。

总之，优先采用全站仪+BIM自动放样（CAD坐标转换），激光扫描点云校验曲面变形，形成动态控制闭环。

参考文献

- [1] 李小林. 圆弧形结构建筑测量施工工程技术探讨. 2022.
- [2] 张秀丽. 浅谈圆弧形结构建筑测量施工工程技术. 2023.