

水利工程中异形结构模板施工精度控制方法研究

文 / 曾招基 广东省水利水电第三工程局有限公司

摘要：针对水利工程中异形结构模板施工难度大、精度控制难以统一的问题，本文以实际工程为依托，开展模板精度控制方法研究。通过构建空间偏差量化模型，明确模板安装的控制目标与偏差限值；分析结构复杂性及施工扰动对模板精度的影响路径，提出基于BIM模型与激光测量融合的空间定位方法、模块化模板组拼与多维支撑体系构造技术，以及全过程浇筑调节与变形监测策略。在工程应用中，通过实测数据对比验证了所提控制方法的有效性，模板综合偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内，混凝土成型轮廓精度显著优于传统工艺，验证了技术体系在异形结构模板施工中的适用性与推广价值。

关键词：水利工程；异形结构；模板施工；精度控制；BIM测控；支撑体系

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.085

引言

异形结构在现代水利工程中的应用日益广泛，其复杂的空间曲面和变截面构造对模板施工精度提出了更高要求^[1]。模板作为混凝土结构成型的直接控制界面，其安装精度不仅影响结构尺寸符合性，还关系到后续工程的施工效率与耐久性能。当前工程实践中普遍存在模板定位不准、支撑体系刚度不足、成型质量波动大等问题，传统依赖人工测量与经验调整的方式难以满足高精度施工需求。为提升异形结构模板施工的可控性与标准化水平，有必要建立一套系统化的精度控制方法体系，涵盖控制目标设定、关键影响因素识别、空间测控技术、模板组拼工艺及全过程动态调整机制。本文结合实际工程，开展模板施工全过程精度控制研究，旨在为复杂结构模板工程提供可操作的技术支撑与优化路径。

一、工程概况

本文以某大型水利枢纽泄洪洞出口段异形结构施工工程为例，结构总长度38m，采用复合曲面变截面设计，最大内轮廓高9.6m，宽度范围为3.2m~6.4m，混凝土强度等级为C40P8，具有较高的抗渗与结构成型精度要求。该段结构内壁曲率连续变化，局部截面存在非对称构造，模板需满足 $\pm 3\text{mm}$ 以内的成型误差控制目标。施工采用整体滑模与分段浇筑相结合的工艺，模板系统由定制钢模与可调支撑装置组成，支撑架体按 18kN/m^2 荷载标准布置。工程地处山区，场地狭窄、吊装空间受限，对模板拼装精度与现场测量控制提出了较高要求。该项目具有异形结构复杂、施工精度高、测控技术集成度强等典型特征。

二、异形结构模板精度控制体系与影响因素

(一) 控制目标设定与偏差限值

异形结构模板施工的精度控制目标需在满足设计形态复现精度、安全性能和施工可操作性之间实现平衡^[2]。结合《水工混凝土施工规范》(SL 677-2014)与项目技术交底要求，本工程模板精度控制限值具体如下：

1. 平面位置偏差 (Δx 、 Δy)： $\leq \pm 5\text{mm}$
2. 高程偏差 (Δz)： $\leq \pm 5\text{mm}$

3. 内轮廓尺寸偏差 (ΔD)： $\leq \pm 3\text{mm}$

4. 表面平整度 (δ)： $\leq 2\text{mm}/2\text{m}$ 直尺检查

综合考虑模板在空间中的定位偏移，引入三维空间综合偏差量：

$$E_{\text{total}} = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad (1)$$

在施工中，依据BIM模型生成的定位基准点，以激光全站仪配合反光靶球实现三维坐标校核，所有模板节点的空间误差 E_{total} 控制在 8mm 以内。同时，采用测点复测机制，每块模板安装后至少在3个控制点进行复检，异常点位偏差须在安装前通过限位卡具或调整螺杆消除。

(二) 结构复杂性对施工精度的影响

异形结构的截面复杂度直接影响模板的设计、加工与装配精度。特别是在双曲面、扭曲面、变厚度截面区域，模板拼接需依据结构曲率连续性进行曲面切片重构。其局部几何复杂度可通过曲率函数 $K(s)$ 进行评估：

$$K(s) = \frac{|x'(s)y''(s) - y'(s)x''(s)|}{(x'(s)^2 + y'(s)^2)^{3/2}} \quad (2)$$

其中， $x(s)$ 、 $y(s)$ 为结构边界曲线的参数表达式， $K(s)$ 越大表示曲率突变程度越高。对于 $K(s) > 0.12$ 区域（对应曲率半径 $< 8\text{m}$ ），需采用数控激光切割精度为 $\pm 0.5\text{mm}$ 的冷弯成型模板单元，现场拼装前在预装平台上完成合模检验，误差超过 $\pm 2\text{mm}$ 的模板单元须重新校调。

此外，在复杂节点区域（如边墙—拱顶过渡段），模板需引入柔性铰接连接结构以适应变形微调，同时在拼缝处采用定制橡胶止水条和钢楔限位槽，确保浇筑过程中不会因混凝土侧压造成缝隙扩张。

(三) 误差来源及干扰路径识别

异形模板施工中的误差可归纳为四类主要来源：

1. 模板加工误差 (Δ_{fab})：来源于切割、焊接或组拼过程，常见于曲面误差、定位孔偏差等，控制方法包括使用三坐标测量仪(CMM)检测模板单元几何尺寸，单块误差 $\leq 1\text{mm}$ 。

2. 现场定位误差 (Δ_{loc})：多因测量基准偏移、坐标传递失真，推荐使用网格控制点 + 激光扫描进行冗余定位^[3]。

3. 支撑系统变形 (Δ_{sup})：由立杆压缩、横杆滑移或节点松动引起。其挠度估算公式为：

$$\delta = \frac{5qL^4}{384EI} \quad (3)$$

其中， q 为均布荷载 (kN/m^2)， L 为支撑跨距， E 为钢材弹性模量 (取 $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$)， I 为模板支撑横杆截面惯性矩，目标为控制 $\delta < 3\text{mm}$ 。

4. 混凝土浇筑荷载变形 (Δ_{load})：在大体积、高落差浇筑段影响显著，推荐采用分层对称浇筑方式，控制入模高度差不超过 1.5m，同时在侧压力较大区域布设可调式斜撑限位器，防止模板向外鼓出。

误差总量可按以下路径关系求解：

$$\Delta_{total} = \Delta_{fab} + \Delta_{loc} + \Delta_{sup} + \Delta_{load} \quad (4)$$

在精度控制过程中，应结合敏感性分析方法 (如局部扰动法或误差传播分析)，评估各源项对总偏差的贡献率，从而优化关键工序控制点位与监测布设策略。例如，在现场测量中，每 10m 设置一组主控点、每节模板设置两组附属校核点，并在安装完成后统一进行空间复测，形成闭环控制机制。

三、关键施工工艺与精度控制方法研究

(一) 空间定位与测控技术

为确保异形模板在复杂曲面结构中的空间定位精度，本工程采用“BIM 建模 + 激光测量 + 反射靶点复核”多源融合测控体系，全面构建“点-线-面”三维控制框架。具体施工方法如下：

1. 控制网布设：以 BIM 模型导出的结构控制点为基础，利用徕卡 TS16 型全站仪布设模板基准控制网，点位精度控制在 $\pm 2\text{mm}$ ，控制点间距不大于 10m，关键曲率过渡段需加密至 5m。

2. 基准传递与靶标布置：模板安装前，先将控制点坐标传递至结构实体，通过布设反光靶标进行施工定位校核^[4]。靶标采用 L-Bar 型钢板靶 (规格：100mm×100mm)，通过磁力贴附或预埋 M10 螺栓固定在结构定位面上。

3. 空间点位复测：模板初装完成后，使用 Leica RTC360 三维激光扫描仪进行扫描建模，获取实测点云与 BIM 模型对比分析，实时提取偏差向量，对偏移超过 $\pm 5\text{mm}$ 区域进行局部调整。

4. 模板面垂直度与曲面弧度校核：利用数字水准仪与配套 ZDL700 高精度光学水准仪对模板边缘及拼接曲线进行精度检测，并通过测距尺与模板预设的弧形钢条限位控制模板外形弧度偏差，确保与设计曲面拟合误差不大于 $\pm 3\text{mm}$ 。

(二) 模板组拼与支撑构造

异形结构模板的组拼施工是确保结构精度与模板稳定性的关键环节，需严格执行标准化模块制造、原位安装与分级调节机制。整体构造示意图如图 1 所示。具体措施如下：

1. 模板单元设计与加工：模板系统采用 3mm 厚 Q345B 钢板配加强肋制成曲面单元，钢板与肋骨间全焊透连接，成型后进行三维激光扫描检验，拼装误差控制在 $\pm 1\text{mm}$ 内。标准模板宽度 0.9m，高度 1.2m，转角处设置柔性插接件。

2. 现场拼装工艺：模板在现场采用编号装配方式，安装前依照图纸编号与空间标高定位。模块间拼缝处采用 $\Phi 8$ 橡胶条填缝，确保封闭性并预留热胀冷缩伸缩缝 1.5mm。安装顺序采用“底板→边墙→拱顶”分段法，提升安装稳定性。

3. 支撑系统构造：采用 $\Phi 48 \times 3.5\text{mm}$ 热镀锌钢管立杆配合可调底座构建满堂支撑架，主承力间距 900mm，纵横交错布置；拱顶及侧壁设置 $\Phi 16$ 钢筋斜撑并设 M12 高强螺栓限位卡具，防止横向失稳^[5]。关键荷载传递点处增加 $\Phi 60 \times 4.0\text{mm}$ 加劲管并设槽钢分配梁。

4. 节点刚性与防变形设计：模板与支架之间采用 U 型卡扣连接，每块模板至少设置 4 点限位。高位模板段采用 C 形抱箍配可调螺杆限位装置，调节幅度 $\pm 20\text{mm}$ ，用于对接缝段的水平调整与初步定形。

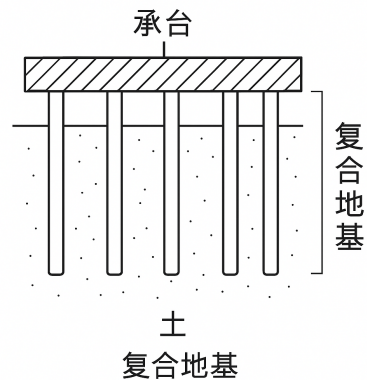


图 1 支撑构造示意图

(三) 浇筑控制与变形调节

浇筑过程中混凝土自重与侧压力将对模板结构造成持续变形趋势，需通过施工组织、工艺控制及变形监测多维措施加以抑制。

1. 分段对称浇筑法：本工程采用每节 12m 长分段、分层、分区对称浇筑工艺，每层浇筑高度不超过 1.2m，间隔浇筑时间控制在 2h 以内。高位拱顶段先封底，后采用导管回填，防止模板上浮。

2. 混凝土侧压力控制：使用 P8 缓凝型混凝土，坍落度控制在 $160 \pm 10\text{mm}$ ，采用连续布料车与插入式振捣棒配合作业，振频 180Hz。为防模板外鼓，在浇筑前

模板背面设定拉杆与反撑，每 2m 设一道 $\Phi 25$ 钢筋拉结螺杆。

3. 模板变形实时监测：关键模板段设 4 个位移监测点，嵌入 LVDT 位移传感器并接入无线数据采集系统，实时上传至施工平台。变形超限警戒值为 $\pm 4\text{mm}$ ，若超出限值，立即暂停浇筑并启动人工调节方案。

4. 施工调节机制：在侧墙与拱顶交汇处设置临时可调撑杆，模板外设 $0^\circ - 20^\circ$ 调角器，若出现偏移，立即采用千斤顶微调压紧，并通过限位楔恢复模板复位。浇筑完毕后 72h 内保持支架状态不变，确保混凝土强度达到设计脱模要求。

四、应用效果分析

(一) 误差统计与偏差评估

为验证所提出精度控制体系的有效性，在模板安装及浇筑完成后，选取代表性结构段进行实测点采集与误差统计，重点评估模板安装空间偏差与混凝土成型偏差。测量采用徕卡 TS16 全站仪结合 Leica RTC360 三维激光扫描仪进行空间点位获取，控制点位总数为 128 组，测量精度优于 $\pm 2\text{mm}$ 。模板偏差统计采用三维坐标差值法，混凝土成型偏差则通过比对设计轮廓与实际成型轮廓获得。结果见表 1。

表 1 异形结构模板与成型混凝土偏差统计结果

检测项目	均值偏差 (mm)	最大偏差 (mm)	控制限值 (mm)	合格率 (%)
模板水平位置偏差 Δx	2.4	4.8	± 5	100
模板垂直位置偏差 Δz	2.9	5	± 5	98.4
模板曲面拟合偏差 E_{surf}	2.1	4.1	± 3	96.1
混凝土结构尺寸偏差 ΔD	2.6	5.2	± 5	97.7
表面平整度 δ (2m 直尺法)	1.4	2	≤ 2	100

从表 1 数据可见，模板空间定位误差全部控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内，曲面拟合偏差平均值为 2.1mm，略低于设定限值，混凝土成型结构尺寸最大偏差 5.2mm，未超过允许误差范围。整体合格率均在 96% 以上，说明本文提出的精度控制方法在异形结构模板施工中具有良好的工程适用性和控制效果。

(二) 控制成效对比分析

为进一步评估本研究方法相较传统控制手段的优势，选取相邻段采用常规控制方式（人工测量 + 手动调节模板）施工的模板段作为对比对象，采用相同测量手段对比其控制指标表现，结果见表 2。

表 2 精度控制方法对比分析结果

项目	传统方法	本研究方法	提升幅度 (%)
模板安装平均偏差 (mm)	6.5	2.5	61.5
模板安装返修频次 (次 / 20m)	3	1	66.7
混凝土成型轮廓合格率 (%)	84.2	97.7	13.5
曲面拟合误差超限比例 (%)	18.4	3.9	-14.5
安装工时 (工日 / 节段)	9.6	7.2	25

对比结果表明，本研究提出的空间测控 + 标准化模板系统 + 全过程调节机制可有效降低模板安装误差，提升混凝土成型精度。其中模板返修频次减少 66.7%，成型结构合格率提高 13.5%，人工工时降低 25%。这表明所提出方法在保障精度的同时兼顾施工效率，具备显著的工程推广价值。

结语

本文以某水利枢纽泄洪洞异形结构模板施工工程为例，系统研究了模板精度控制体系的构建方法与关键技术实现路径。通过设定模板空间误差限值与成型质量控制指标，结合 BIM 空间建模、激光测量复核、模块化模板拼装与全过程支撑调节机制，实现了异形结构模板的高精度定位与稳定支撑。实测数据表明，模板综合偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内，混凝土成型结构轮廓合格率达到 97% 以上，较传统方法在控制精度、返修频次与施工效率方面均有显著提升。研究成果为异形水工结构模板施

工提供了可复制、可落地的精度控制技术体系，具备良好的工程推广价值。

参考文献

- [1] 翟光耀, 崔立会, 陈城, 等. 多孔洞异形双曲面清水混凝土结构施工技术分析 [J]. 安徽建筑, 2025, (05): 45-47.
- [2] 唐春明, 李太波, 洪建鸿, 等. 大跨度夹空异形梁施工技术工业建筑施工中的应用研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2024, (24): 125-127.
- [3] 邓亮, 陈鑫煜, 季清, 等. 异形模板万向 U 型扣单钢管支撑排架结构体系研究与应用 [J]. 建筑施工, 2024, 46 (12): 2012-2016.
- [4] 韩旭. 异形 UHPC 装配整体式梁板结构模板体系及施工方法研究 [J]. 建筑施工, 2024, 46 (10): 1557-1560.
- [5] 崇艳超. 异形曲面结构清水混凝土施工研究 [J]. 低碳世界, 2024, 14 (06): 67-69.

作者简介：曾招基（1995-10），男，广东陆丰人，汉族，本科，助理工程师，主要研究方向为水工施工。